



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**VLIV TECHNOLOGICKÉHO PROCESU PRÁŠKOVÉHO  
LAKOVÁNÍ NA KVALITU POKOVENÍ STŘÍBREM U  
KOMPONENT PLYNEM IZOLOVANÝCH ROZVODEN – GIS**

INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PROCESS OF POWDER PAINTING ON THE QUALITY OF SILVER-  
PLATED COMPONENTS IN GAS INSULATED SUBSTATION - GIS

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Eliška Nováková**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Jaroslav Kubíček**

**BRNO 2019**

# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Studentka: **Bc. Eliška Nováková**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Strojírenská technologie  
Vedoucí práce: **Ing. Jaroslav Kubíček**  
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## **Vliv technologického procesu práškového lakování na kvalitu pokovení stříbrem u komponent plynem izolovaných rozvodů – GIS**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Rozvodny velmi vysokého napětí jsou prostorově rozlehlé komplexy. V městské zástavbě jsou tyto rozvodny realizovány s plynem izolovanými vodiči vedenými v hliníkových trubkách. Řešení vnitřní povrchové úpravy trubek je pro správnou funkci zařízení velmi důležité.

### **Cíle diplomové práce:**

1. Rozbor problematiky plynem izolovaných rozvodů velmi vysokého napětí.
2. Literární studie technologie práškového lakování a technologie pokovení stříbrem.
3. Rozbor hlavních vlivů na kvalitu povlaku stříbra.
4. Návrh a realizace experimentálních zkoušek.
5. Vyhodnocení výsledků.

### **Seznam doporučené literatury:**

ASM handbook. Surface Engineering Volume 5. 10th editon. Materials Park, Ohio: ASM International, 2016. ISBN 978-0-87170-384-2.

MOHYLA, Miroslav. Technologie povrchových úprav kovů. 3. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2006. ISBN 80-248-1217-7.

SEDLÁČEK, Vladimír. Povrchy a povlaky kovů. Praha: ČVUT, 1992. ISBN 80-01-00799-5.

PODJUKLOVÁ, Jitka. Speciální technologie povrchových úprav I. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 1997. ISBN 80-7078-235-8.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Práce řeší problematiku nanášení povlaku stříbra na vnitřní povrch dílce trubkovitého tvaru vyrobeného z hliníkové slitiny EN AW-6101B. Vysoká afinita hliníku ke kyslíku, heterogenita povrchu a přítomnost vodíku v základním materiálu patří mezi vlastnosti, které omezují tvoření kvalitního kovového povlaku na povrchu hliníkové slitiny. Nasycení základního materiálu vodíkem, vlivem například předúpravy povrchu nebo procesu vylučování povlaků, může za určitých podmínek způsobit vady povlaku stříbra v podobě bublin (puchýřů). Dalšími faktory, které mohou ovlivňovat kvalitu povlaku stříbra, jsou způsob vytvoření mezivrstvy a podmínky elektrolytického vylučování stříbra.

Klíčová slova: hliník, předúprava, elektrolytické pokovení, stříbření, vady

## **ABSTRACT**

The thesis deals with the topic of silver coating on the inner surface of the tubes made of aluminum alloy EN AW-6101B. The high affinity of the aluminum for the oxygen, the heterogeneity of the surface and the presence of the hydrogen in the base material, are the properties which hinder the formation of metallic coating on the surface of the aluminum alloy. The saturation of the base material with the hydrogen, e.g. due to the pretreatment of the surface or by the process of creating of coatings, may under certain conditions cause the defects of the silver coating in the form of the bubbles (blisters). Other factors that may affect the quality of the silver coating are the way of creating of the interlayer and the conditions for the electrolytic deposition of the silver.

Keywords: aluminum, pretreatment, electrolytic plating, silver plating, defects

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

NOVÁKOVÁ, Eliška. *Vliv technologického procesu práškového lakování na kvalitu pokovení stříbrem u komponent plynem izolovaných rozvodů – GIS*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/113119>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jaroslav Kubíček.

## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracovala samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V ..... dne .....

.....

Podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto děkuji panu Ing. Jaroslavu Kubíčkovi za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce. Dále děkuji panu Bc. Václavu Holečkovi za odborné rady a konzultace diplomové práce. Děkuji také firmám ABB a LARS Chemie za poskytnutí prostoru a vybavení pro zpracování experimentální části diplomové práce. Poděkování patří i mé rodině, která mě po dobu studia a psaní diplomové práce podporovala.

# OBSAH

Zadání diplomové práce

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD .....	10
1 ROZBOR PROBLEMATIKY VODIČŮ .....	11
2 TECHNOLOGIE PRÁŠKOVÉHO LAKOVÁNÍ.....	13
2.1 Mechanická předúprava povrchu .....	13
2.2 Chemická předúprava povrchu .....	14
2.2.1 Čištění a odmaštění.....	14
2.2.2 Moření .....	16
2.2.3 Nanášení konverzní vrstvy .....	17
2.3 Elektrostatická aplikace PNH .....	21
2.3.1 Práškové barvy .....	23
2.3.2 Corona nabíjení .....	24
2.3.3 Tribo nabíjení .....	25
2.3.4 Vytvrzování PNH .....	26
3 NANÁŠENÍ STŘÍBRA NA HLINÍK A JEHO SLITINY .....	27
3.1 Předúprava povrchu .....	27
3.2 Elektrolytický způsob tvoření mezivrstvy .....	28
3.3 Chemický způsob tvoření mezivrstvy .....	30
3.4 Povlaky stříbra .....	31
3.5 Vady povlaku stříbra .....	33
4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	35
4.1 Velikost a materiál vzorků .....	35
4.2 Návrh experimentů.....	36
4.2.1 Určení potenciálních vlivů na kvalitu povlaku stříbra v procesu stříbření.....	36
4.2.2 Vyloučení vlivu teploty vypalovací pece na změnu mikrostruktury vodiče .....	37
4.2.3 Testování kvality povlaku stříbra a vlivu na jeho zatížení procesem práškového lakování .....	38
4.2.4 Testování vlivu vzdušného kyslíku na oxidaci hliníkové slitiny.....	39
4.3 Průběh a vyhodnocení experimentů.....	39
4.3.1 Určení potenciálních vlivů na kvalitu povlaku stříbra v procesu stříbření.....	40
4.3.2 Vyloučení vlivu teploty vypalovací pece na změnu mikrostruktury vodiče .....	42
4.3.3 Testování kvality povlaku stříbra a vlivu na jeho zatížení procesem práškového lakování .....	44
4.3.4 Testování vlivu vzdušného kyslíku na oxidaci hliníkové slitiny.....	54



4.4 Shrnutí výsledků experimentu .....	55
5 ZÁVĚRY .....	57

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratek

Seznam příloh

## ÚVOD [2], [3], [4], [5], [6]

Důležitým prvkem energetických sítí jsou rozvodny, které umožňují přenos energie mezi elektrárnami a přenosovou nebo distribuční sítí. Dnes rozlišujeme tři základní druhy rozveden, které jsou izolované buď vzduchem (AIS = air insulated switchgear), ochranným plynem (GIS = gas insulated switchgear) nebo hybridní technologií (MTS = mixed technology switchgear) kombinující výhody AIS a GIS.

Plynem izolované rozvodny jsou vhodné jak pro instalaci uvnitř budov (obr. 1), tak pro venkovní instalaci (obr. 2, obr. 4). Lze je nalézt od pouští (obr. 3) a hor, přes zalidněná, obtížně přístupná centra velkoměst, až po mořské plošiny. V porovnání se vzduchem izolovanou rozvodnou mají GIS nižší požadavky na prostor a uplatňují se v místech s omezeným přístupem, v elektrárnách, v administrativních budovách, ale také v podzemí. Díky tomu, že je lze umístit velmi blízko centru zatížení, jsou mimo jiné výhodou nízké pořizovací a provozní náklady. Nízká hladina hluku a nízké elektromagnetické emise umožňují provoz v obytných budovách a v průmyslových zónách. Mají dlouhou životnost (až 80 let) a dlouhé servisní intervaly díky regeneračním schopnostem plynu.

Aktivní části rozvodny jsou izolované fluoridem sírovým ( $\text{SF}_6$ ). Fluorid sírový je bezbarvý, netoxický a elektronegativní plyn. Má téměř třikrát větší elektrickou pevnost než vzduch a tím umožňuje přenos elektrické energie na menší ploše (uplatnění v místech s omezeným prostorem). Je inertní, při normální teplotě stálý a má vysokou vypínací schopnost – v oblasti elektrického oblouku se rozkládá, zhasíná oblouk a opět regeneruje.

Vzhledem k tomu, že napětí v GIS rozvodnách může dosahovat velmi vysokých hodnot (od 52 do 1200 kV), je zde velice důležité zaručit bezpečnost a spolehlivost přenosu elektrické energie s nízkými ztrátami. Spolehlivý tok elektrického proudu vodičem ovlivňuje jak jeho povrchová úprava, tak i materiál v místě „studeného“ spojení vodičů.



Obr. 1 GIS – vnitřní instalace [8]



Obr. 2 GIS – venkovní instalace [9]



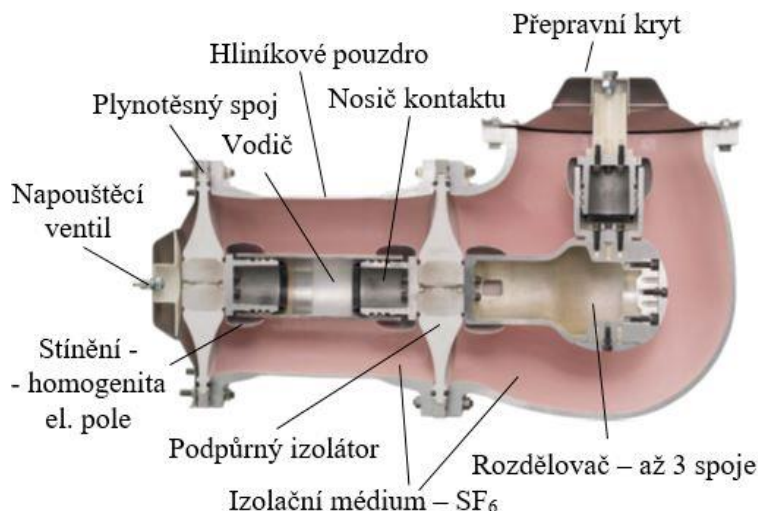
Obr. 3 Stavba plynem izolovaného vedení vysokého napětí na poušti [11]



Obr. 4 Stavba GIS ve Spojených arabských emirátech [11]

# 1 ROZBOR PROBLEMATIKY VODIČŮ [6], [7], [10], [12], [17], [18], [19], [20]

Zapouzdřené vodiče charakterizují dva základní prvky: vodič a pouzdro (obr. 5). Pro výrobu vodiče, pouzdra a dalších komponent se používají různé slitiny hliníku (tab. 1). Pouzdro chrání axiálně uložený vodič a ostatní aktivní části (například nosiče kontaktu, stínění atd.). Dále brání spolu s plynotěsnými spoji a izolátory úniku plynu SF<sub>6</sub> do atmosféry. Vodiče, které patří mezi aktivní části, slouží k přenosu elektrické energie o určitých hodnotách napětí. Aby k přenosu elektrické energie mohlo dojít, jsou jednotlivé aktivní části zapouzdřených vodičů spojené pomocí „studených“ spojů.



Obr. 5 Plynem izolovaný zapouzdřený vodič [10]

Tab. 1 Nejčastější slitiny hliníku komponent GIS [15], [16].

ČSN EN 573-3 a ČSN EN 1706			DIN 1725-1 a DIN 1725-2	
Číselné označení	Chemické označení	Stav	Číselné označení	Chemické označení
EN AC-42100	EN AC-Al Si7Mg0,3	T6	3.2371.61	G-AlSi7Mg
EN AW-6082	EN AW-Al Si1MgMn	T6	3.2315	AlMgSi1
EN AW-6101B	EN AW-Al MgSi(B)	T6, T7	3.3207	E-AlMgSi0,5
EN AW-6101A	EN AW-Al MgSi(A)	T6	-	-
EN AW-6360	EN AW-Al SiMgMn	-	-	-

„Studené“ spojení vodičů se skládá z vodiče, nosiče kontaktu a kontaktní pružiny. Na tyto spoje se z důvodu zvýšení elektrické vodivosti a snížení elektrického odporu nanáší vrstva stříbra. Stříbrný povlak v místě kontaktu musí splňovat předepsané požadavky na kvalitu a spolehlivost. Mezi tyto požadavky patří:

- vysoké adhezní vlastnosti elektrických kontaktů,
- vysoká abrazivní odolnost elektrických kontaktů vystavených dynamickému zatížení,
- vysoká vodivost,
- homogenita povlaku,
- tloušťka povlaku, tvrdost povlaku a korozní odolnost.

Diplomová práce se dále zabývá pouze problematikou vodičů, které po dodání dodavatelem mají konce opatřené vrstvou stříbra a procházejí práškovou lakovnou. Tyto komponenty velmi často vykazují vady povlaku stříbra na jejích koncích. Vodiče jsou vyrobeny ze slitiny hliníku. Samotný hliník má velmi výhodnou kombinaci fyzikálních, mechanických, chemických a technologických vlastností. Má dobrou tepelnou a elektrickou vodivost (tab. 2). Díky vzniku ochranné vrstvy Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> je odolný vůči korozi a má dobrou schopnost k tváření za tepla i za studena. Hliník má ale nízké pevnostní vlastnosti, proto jsou vodiče vyrobeny ze slitiny hliníku, která má vyšší pevnostní vlastnosti než čistý hliník, ale nižší elektrickou vodivost.

Stříbro má velmi vysokou elektrickou i tepelnou vodivost (tab. 2), proto se v elektrotechnickém průmyslu velmi často používá jako kontaktní kov. Patří mezi ušlechtilé kovy. Je velmi měkké a na vzduchu je stálé. Za přítomnosti kyslíku se pokrývá vlivem sirovodíků vrstvou sulfidu stříbrného ( $\text{Ag}_2\text{S}$ ), který způsobuje černání stříbra.

Tab. 2 Vybrané fyzikální vlastnosti hliníku a stříbra [12], [13], [14], [19].

Vlastnosti	Jednotka	Hliník	Stříbro
Hustota	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$	2 698.9	10 500
Teplota tavení	$[\text{°C}]$	660.4	961.9
Elektrická vodivost	$[\% \text{ IACS}^*]$	61.00	105
	$[\text{S}\cdot\text{m}^{-1}]$	$3.538\cdot 10^7$	$6.09\cdot 10^7$
Elektrický odpor (při 20 °C)	$[\Omega\cdot\text{m}]$	$2.826\cdot 10^{-8}$	$1.642\cdot 10^{-8}$

\*Elektrická vodivost je vztažena k vodivosti mědi ( $5.8001\cdot 10^7 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ ), kterou organizace IACS (International Annealed Copper Standard) stanovila jako 100 % IACS při 20 °C.

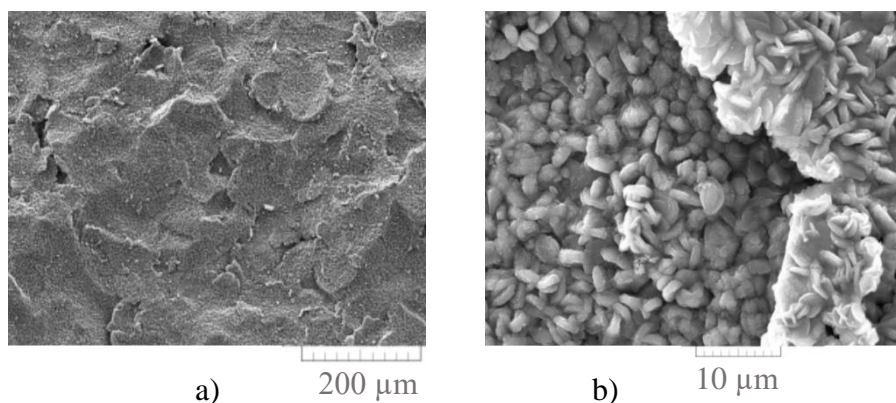
Vodiče před umístěním do montážních jednotek plynem izolovaných rozveden procházejí procesem práškového lakování. Práškové nátěrové hmoty (PNH) zvyšují odolnost proti korozi a v případě aktivních ploch (plochy ve styku s  $\text{SF}_6$ ) se PNH nanáší za účelem homogenizace a elektrické izolace povrchu vodičů. Nanesená vrstva práškové nátěrové hmoty musí splňovat (podle typu aplikace) předepsané požadavky na:

- odolnost proti povětrnostním vlivům,
- odolnost proti korozi,
- adhezi povlaku,
- minimální obsah křemíku,
- absenci defektů lakovaného povrchu (cizí částice, póry, výstupky, prach apod.).

Úkolem diplomové práce je ověřit vliv procesu práškového lakování na kvalitu povlaku stříbra v místech kontaktů u vodičů. Tato práce se proto bude zabývat jak technologií práškového lakování, tak i technologií nanášení stříbra na hliník a jeho slitiny.

## 2 TECHNOLOGIE PRÁŠKOVÉHO LAKOVÁNÍ [21]

Cílem předúpravy povrchu je vždy očištění a vytvoření vhodné kotvící plochy pro aplikaci PNH. Pokud má povrch dostatečnou drsnost, zpravidla jej stačí pouze očistit (odmastit). Obecně však platí, že čím je větší styčná plocha, tím je lepší i přilnavost nátěrové hmoty. Styčnou plochu lze zvětšit mechanickou úpravou povrchu, nejčastěji tryskáním, nebo vytvořením konverzní vrstvy na povrchu součásti. Obrázek 6 demonstruje rozdíl mezi mechanickou (tryskání) a chemickou předúpravou (fosfátování). Volba způsobu předúpravy závisí nejen na velikosti kotvící plochy, ale i na požadované velikosti korozní odolnosti a dalších kritériích.



Obr. 6 Vzhled povrchu a) po tryskání, b) po fosfátování [21], [23]

Před aplikací práškové nátěrové hmoty je možné provést dva základní způsoby předúpravy povrchu součásti:

- mechanická předúprava,
- chemická předúprava.

### 2.1 Mechanická předúprava povrchu [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28]

Účelem mechanických úprav povrchu před nanesením vrstvy práškové nátěrové hmoty je především odstranění nečistot (příp. vad) z povrchu materiálu, zajištění optimální přilnavosti následujících vrstev a zvýšení odolnosti proti korozi a opotřebení. Nejčastějšími metodami mechanické předúpravy povrchu hliníku a jeho slitin jsou:

- Broušení – dochází při něm k úběru tenké vrstvy materiálu a tím k odstranění nepravidelností povrchu (např. švy odlitků, výkovků, rýhy), oxidických vrstev a korozních produktů. Broušení slouží k dosažení optimální drsnosti povrchu a ke zvyšování přilnavosti následující vrstvy pomocí brusných pásů, lamel, roun (např. brusné rouno Scotch-Brite), kotoučů apod. Brusivo vhodné pro hliník je například umělý korund ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) nebo karbid křemíku ( $\text{SiC}$ ). Při procesu broušení je povrch v jednotlivých operacích opracováván postupně pomocí nejprve hrubších a poté jemnějších brusných prostředků. Směr broušení v jednotlivých operacích by měl být různý. Zrnitost brusiva poslední operace musí splňovat požadavky následující operace.
- Kartáčování – používá se k odstranění hrubých nečistot (staré nátěry, volné korozní produkty apod.), oxidických vrstev vzniklých například v předchozí operaci broušení a k sjednocení drsnosti povrchu. Proces kartáčování lze rozdělit do dvou stupňů: předčištění kartáčem se silnějšími dráty a dočištění kartáčem s jemnými dráty. V případě velké vrstvy korozních produktů není kartáčování vhodné, protože se tyto nečistoty z povrchu odstraní jen částečně.

Kartáče vhodné pro hliník jsou osazené například dráty z nerezové oceli či mosazi, plastovými vlákny (např. nylonovými) s brusným zrnem z karbidu křemíku nebo



korundovým zrnem. Nevhodné jsou kartáče osazené ocelovými vlákny, které mohou způsobit korozi povrchu.

- Tryskání – provádí se vrháním abraziva o optimální rychlosti směrem k povrchu materiálu. Zbavuje povrch nečistot, korozií produktů a zvětšuje styčnou plochu pro zakotvení následující vrstvy. Zároveň při dopadu abrazivních zrn dochází také k plastické deformaci, příp. ke zpevnění povrchu. Při přílišném zdrsnění povrchu hrozí snížení ochranné funkce nátěrového systému. Vrcholky základního materiálu, které jsou proto pokryté jen slabě nebo úplně vyčnívají z nátěrového systému, potom působí jako zárodky koroze.

Parametry, které mají vliv na výsledný vzhled a vlastnosti povrchu po tryskání, jsou: typ tryskacího materiálu (velikost, hmotnost, tvrdost a tvar), rychlost dopadu částic na povrch materiálu, hustota částic dopadlých za jednotku času, úhel dopadu a doba tryskání.

Při tryskání hliníku a jeho slitin se používají takové tryskací materiály, které nezanechávají na povrchu stopy železa způsobující korozi. Příkladem nevhodného tryskacího materiálu jsou ocelové broky. Naopak vhodným abrazivním materiálem pro tryskání hliníku je například korund, balotina (skleně mikrokuličky), příp. písek.

## 2.2 Chemická předúprava povrchu [19], [29], [30]

Chemická předúprava povrchu je komplexní proces, při kterém reagují chemická činidla s nečistotami na povrchu materiálu. Cílem tohoto procesu je dosáhnout pomocí vhodných chemických reakcí optimální přilnavosti mezi základním materiálem a vrstvou a současně zvýšit odolnost proti korozi nátěrového systému.

Chemickou předúpravu povrchů hliníkových součástí lze rozdělit do tří fází: odmaštění (odstranění nečistot), moření (odstranění vnějších, nehomogenních oxidických a hydroxidových vrstev), konverzní úprava (pasivace povrchu). Mezi tyto kroky (stupně) se dle zvoleného technologického postupu zařazuje jedno či více stupňový oplach součástí. Výběr správného technologického postupu chemické předúpravy závisí především na vlastnostech základního materiálu (legující prvky), druhu kontaminace, drsnosti povrchu, na požadované korozní odolnosti komponent, následných procesech (práškové lakování, galvanické pokovení apod.), vybavení a provozních nákladech, příp. na kapacitě zařízení.

### 2.2.1 Čištění a odmaštění [19], [22], [23], [24], [30], [31], [32], [33], [34]

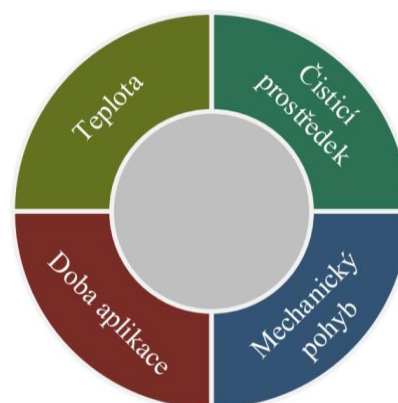
Čištění (odmaštění) se řadí mezi úpravy povrchu bez jeho znatelných změn. Účelem je zbavit povrch konzervačních látek a všech fyzikálně vázaných nečistot jako jsou třísky, prach apod., které vznikly na povrchu materiálu díky předchozímu mechanickému opracování.

Chemické a fyzikální účinky čisticího prostředku lze rozdělit do následujících hlavních procesů:

- odstraňování a zmýdelňování olejů a tuků,
- emulgování odstraněných mastnot,
- disperze částic,
- rozpouštění solí,
- zabránění srážení tvrdých částic.

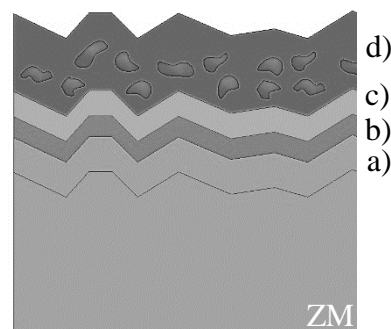
Čistící účinek závisí především na vzájemné souhře čtyř následujících faktorů (obr. 7): čisticích přísad, vhodně zvolené teplotě, mechanickém pohybu lázně a době aplikace. Nedostatečnost jednoho z faktorů je nutné kompenzovat posílením ostatních.

Nečistoty tvoří na povrchu základního materiálu různé vrstvy (obr. 8):



Obr. 7 Faktory čištění [23]

- a) deformovaná hraniční vrstva základního materiálu – způsobená procesem obrábění (frézování, broušení apod.) má stejné chemické složení jako základní materiál (ZM),
- b) reakční vrstva – skládá se především z oxidů základního materiálu, ale obsahuje také reakční produkty aditiv v obráběcích olejích (fosfáty, sulfidy apod.),
- c) sorpční vrstva – tvořená například povrchově aktivními přísadami z emulzí a chladicích medií nebo antikorozními činidly,
- d) vrstva znečištění – má proměnlivou tloušťku a skládá se především z různých olejů, tuků a pevných částic.



Obr. 8 Vrstvy znečištění [31]

Nečistoty lze rozdělit dle povahy vazby k základnímu materiálu do dvou základních skupin:

- ulpělé nečistoty – vázané fyzikálními silami, jsou to různé mastné látky (např. zbytky brusných past, emulzí, olejů apod.), částice obrobeneho základního materiálu z předchozích operací (např. třísky, prach), nerozpustné anorganické nečistoty (např. brusiva, grafit, prach z ovzduší),
- vlastní nečistoty – vázané se základním materiálem chemickou vazbou (korozní produkty, přírodní oxidické vrstvy ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), apod.).

Dále je možné nečistoty rozdělit podle chemického složení na:

- organické nečistoty (oleje – minerální, živočišné, rostlinné a syntetické oleje, maziva, různé emulze a chladicí maziva, antikorozní činidla i otisky prstů na povrchu materiálu),
- anorganické nečistoty (korozní produkty, oxidy, soli, prach, grafit, leštící a brousící směsi, různé vláknité nečistoty).

Vodou ředitelné čisticí prostředky se zpravidla skládají ze dvou hlavních částí: základní složky a tenzidů. Základní složky lázní jsou na bázi buď alkalické, nebo kyselé. Optimální čisticí účinek je závislý na druhu znečištění a na podmínkách procesu (postřik, ponoření, příp. ultrazvuk).

Dle povahy lze lázně pro čištění součástí z hliníku a jeho slitin rozdělit na alkalické a kyselé. Alkalické lázně obsahují nejčastěji anorganické soli, jako jsou fosfáty, boritany, uhličitany, hydroxidy a křemičitany. Kyselé lázně obsahují základní složky, jako jsou anorganické kyseliny (kyselina fosforečná, sírová, chlorovodíková, fluorovodíková apod.). Některé čisticí prostředky mohou obsahovat i organické kyseliny.

Tenzidy jsou povrchově aktivní látky, které snižují povrchové napětí kapalin, zlepšují smáčecí schopnost a dispergovatelnost lázně. Molekuly tenzidů se skládají z polární (hydrofilní) a nepolární (hydrofobní) části. Podle typu (aniontové, kationtové a neiontové) mají buď emulgující, nebo deemulgující účinek. Emulze je koloidní disperzní systém, ve kterém je jedna kapalina rozptýlena ve druhé, a obě kapaliny jsou navzájem v sobě nerozpustné. Emulgující čisticí přípravky mají vysokou schopnost rozpouštění širokého spektra znečištění a mastnoty. V případě emulgujících přípravků je potřeba při přípravě lázně volit obsah jednotlivých složek tak, aby vzniklé emulze a disperze nebyly příliš stálé, ale pouze zabráňovaly zpětnému usazování nečistot na předmětech. U deemulgujících přípravků oddělená vrstva mastnoty a nečistot plave na povrchu lázně, a proto je nutné tuto vrstvu nepřetržitě odebírat.

V současné době jsou na trhu přípravky, které sdružují odmaštění a moření v jeden krok. Existuje jak kyselé odmaštění s mořením, tak alkalické odmaštění s mořením (příloha 1). Tyto roztoky mají kromě odmašťovací schopnosti (čisticí) i schopnost mořící.

### 2.2.2 Moření [19], [35], [36], [38], [39], [75]

Moření slouží k odstraňování anorganických látek, především okují, korozních produktů a oxidické vrstvy vytvořené na povrchu hliníku nebo jeho slitině. Před moření je pro dosažení požadované kvality úpravy povrchu zařazen proces čištění (odmaštění), které slouží k odstranění různých nečistot (anorganického nebo organického původu) a pevných částic.

Hliníkové slitiny pro průmyslové účely se skládají z několika různých prvků (hliník, křemík, železo, měď, mangan, hořčík, zinek, chrom atd.), které mají výrazný vliv na mechanické a chemické vlastnosti slitiny i na vlastnosti povrchu po moření. Legující prvky, druh znečištění a použití následné technologie jsou hlavními kritérii pro volbu druhu moření. Moření se dělí podle povahy lázně na alkalické a kyselé.

Alkalické moření (obr. 9 b) odstraňuje nebo redukuje škrábance, rýhy, hluboké stopy po protlačování, lisování apod. a jiné nedokonalosti povrchu. Nicméně pokud je povrch výrobku kontaminován nečistotami, které nebyly odstraněny před aplikací mořicího roztoku, mohou se tyto nečistoty během moření zvýraznit. Alkalická mořicí lázeň je ve většině případů založena na bázi hydroxidu sodného (tabulka 3) s příměsí aditiv podporujících mořicí efekt. U dílů s malou tloušťkou stěny není moření vhodné, protože hrozí rozpuštění materiálu. Alkalické moření můžeme podle ČSN EN ISO 7599 rozdělit na E0 a E6 moření:

- E0 moření – definováno jako úprava povrchu (před anodickou oxidací), při které se povrch bez další předúpravy odmastí a dezoxiduje. Mechanické stopy na povrchu, jako je rýhování a poškrábání, zůstanou viditelné. Koroze, která zůstala na povrchu před tímto zpracováním, se může stát viditelnou. Přípravky pro E0 moření jsou alkalické mořicí roztoky, které v krátké expoziční době dosahují maximálního mořicího účinku. Tento způsob předúpravy slouží k čištění povrchu, především k odstranění oxidických sloučenin.
- E6 moření – definováno jako chemické leptání, kdy po odmaštění a následném zpracování ve speciálních alkalických roztocích získá povrch saténový nebo matný vzhled. Mechanické stopy na povrchu jsou vyhlazeny, ale ne zcela odstraněny. Stopy koroze mohou být po moření viditelné. Tyto vady lze odstranit pomocí mechanické úpravy před mořením. Roztoky pro E6 moření jsou charakteristické vysokým obsahem hliníku (tab. 3) a obsahem volného hydroxidu. Cílem E6 moření je zploštění povrchu, tzn. odstranění hran mikroprofilů. Volný alkalický hydroxid podporuje rozpouštění hliníku. Speciální mořicí přísady a vysoká koncentrace hliníku (tím i vysoká viskozita roztoku) zabraňují v prohlubních reliéfu povrchu odstraňování základního materiálu. V prohlubních profilu se nachází na rozhraní základního materiálu a mořicího roztoku tekutý film s vysokou koncentrací hliníku. Rychlost reakce je v těchto místech nižší než na vrcholcích profilu, a tím dochází k efektu snižování drsnosti povrchu.

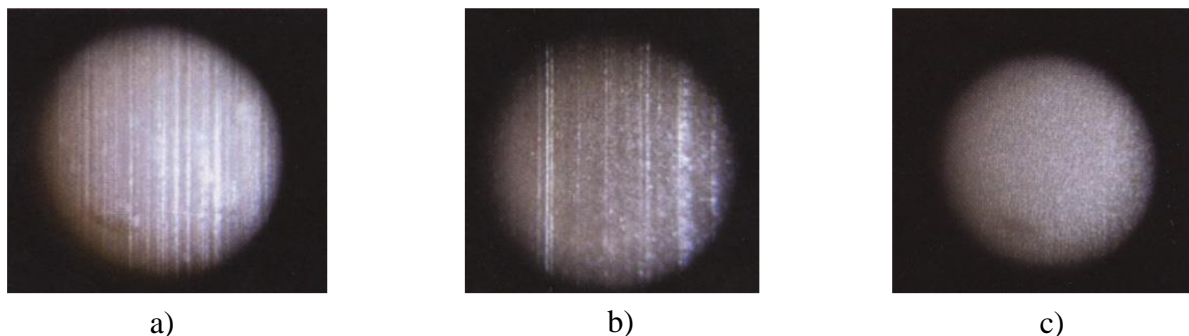
Tab. 3 Typické parametry E0 a E6 moření [19].

Parametr	Jednotka	E0 moření	E6 moření
Koncentrace NaOH	[g·l <sup>-1</sup> ]	30 – 40	40 – 70
Koncentrace Al	[g·l <sup>-1</sup> ]	< 40	120 – 170 (220)
Teplota	[°C]	40 – 50	55 – 70
Čas	[min]	2 – 10	12 – 20
Aditiva	[-]	ANO / NE	ANO
Rychlost moření	[g·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	400 - 800	200 - 500

Kyselé moření (obr. 9 c) je nejčastěji používáno pro moření odlitků zejména s vyšším obsahem křemíku. Používají se roztoky na bázi kyseliny chlorovodíkové, dusičné,



fluorovodíkové, fosforečné, chromové a sírové. Ve specifických aplikacích se často používá kombinace těchto kyselin nebo směs kyselin a solí. Hlavním cílem kyselého moření je odstranění oxidických a hydroxidových vrstev, proto se často označuje jako dezoxidace. Výsledný matný povrch je vytvořený pomocí mikro-leptání. Protože se při kyselém moření odstraní mnohem méně materiálu než při alkalickém moření, skrytí nedokonalostí je jednodušší.



Obr. 9 Povrch a) nemořený, b) po alkalickém moření, c) po kyselém moření [38].

V některých případech (příloha 1) může kyselé moření předcházet nebo následovat po alkalickém moření. Před alkalickým mořením se obvykle používá pro odstranění oxidů z povrchu součásti. Následuje po alkalickém moření v případě, že se během alkalického moření vytvoří na povrchu součásti vrstva šedého až černého reziduálního filmu. Tento film je tvořen prvky, které jsou v hydroxidu sodném nerozpustné: železo, křemík, měď a další slitinové složky.

### 2.2.3 Nanášení konverzní vrstvy [19, 21, 23, 29, 35, 37, 40, 41, 42, 46, 50, 51, 52, 53, 61]

Nanášení konverzní vrstvy neboli pasivace povrchu je proces, při kterém se zvyšuje korozní odolnost povrchu a zvětšuje se styčná plocha a tím i přilnavost PNH. Tento proces je zpravidla posledním krokem chemické předúpravy, před kterým je dle určitých kritérií zařazen krok odmaštění a moření. Metody, které jsou vhodné k nanášení konverzní vrstvy na hliníkové komponenty, jsou:

- Metoda chromátování – klasická konverzní úprava povrchu před lakováním. Rozlišují se dva základní typy chromátových konverzních povlaků vhodných jako podklad před nanesením nátěru: žluté a zelené. Chromátové povlaky lze dále rozdělit na oplachované (povlak se před sušením opláchnou vodou) a neoplachované (povlak se suší bezprostředně po chromátování).

Chromátovací roztoky jsou kyselého charakteru. Obsahují šestimocný nebo trojmocný chrom jako reakční látku, který spolu s ostatními složkami roztoku ovlivňuje vzhled a tvrdost vrstvy. Barva závisí na složení roztoku, je však ovlivněna i teplotou a hodnotou pH, dobou nanášení, mícháním roztoku a stavem povrchu slitiny. Nejčastější technologie nanášení chromátových konverzních povlaků jsou ponorem, postřikem, naválcováním nebo rozetřením. U oplachových metod je nezbytný finální oplach. Po oplachu zpravidla následuje sušení.

- Žluté chromátování – tvoří na povrchu materiálu konverzní vrstvu, kde hlavní součásti vrstvy jsou hydratované oxidy hlinité, trojmocný a šestimocný chrom. Vrstva se vyznačuje hrubou strukturou, na kterou pak velmi dobře přilne nanášený materiál. Praskliny ve vrstvě jsou způsobeny dehydratací během sušení, avšak nedosahují až k základnímu materiálu. Šestimocný chrom v konverzní vrstvě sice zvyšuje korozní odolnost, na druhou stranu je však karcinogenní a může vyvolat genetickou mutaci. Příklad procesních kroků žlutého chromátování je v příloze 2.

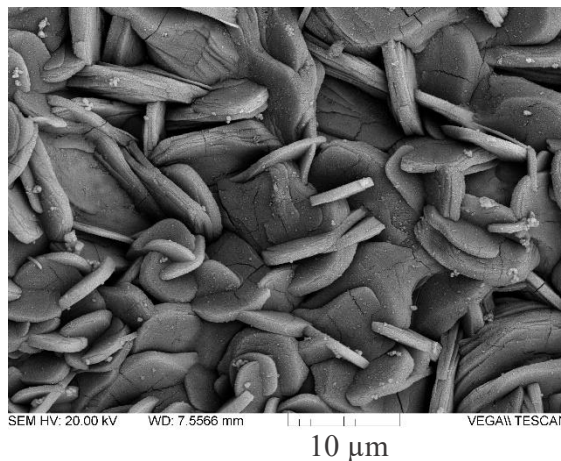
- Zelené chromátování – alternativní metodou k žlutému chromátování. Konverzní vrstva se skládá hlavně z fosforečnanu chromitého a hydratovaných oxidů hlinitých. Podíl šestimocného chromu je u této metody pod analytickou hranicí prokazatelnosti. Na základním materiálu se během chemické reakce vytvoří stabilní, převážně oxidická bariérová vrstva, která má podobně jako u žlutého chromátování jemně zdrsňelý povrch. Díky tomu zvyšuje adhezi povlaků. Doporučené hmotnosti vrstev u zeleného i žlutého chromátování jsou v tabulce 4. Příklad procesních kroků zeleného chromátování je v příloze 2.
- Bezoplachové (no-rinse) metody – při tomto způsobu předúpravy není do procesu po vytvoření konverzní vrstvy zařazen oplach. Přípravky jsou kombinací anorganické konverzní metody a organického vytvrzení. Vedle anorganických komponent pro tvorbu vrstvy obsahují přípravky určitý podíl polymerních složek. Vlastní chemická reakce nastává při sušení součásti v peci, kde dochází k vysušení vody vázané v polymeru. Během procesu sušení se vytvoří na povrchu materiálu konverzní vrstva s polymerním filmem. Teplota součásti se při sušení pohybuje mezi 60 – 90 °C a je závislá na konkrétním přípravku. Bezoplachové systémy jsou dostupné jak s obsahem, tak i bez obsahu chromu. Doporučené hmotnosti vrstev dle GSB International a Qualicoat u bezoplachového chromátování jsou v tabulce 4.

Tab. 4 Doporučené hmotnosti chromátových vrstev [42], [43].

	Žluté chromátování		Zelené chromátování	
	GSB International	Qualicoat	GSB International	Qualicoat
Oplachové	0,4 – 1,0 g·m <sup>-2</sup>	0,6 – 1,2 g·m <sup>-2</sup>	0,4 – 1,2 g·m <sup>-2</sup>	0,6 – 1,5 g·m <sup>-2</sup>
Bezoplachové	0,6 – 1,0 g·m <sup>-2</sup>		0,6 – 1,2 g·m <sup>-2</sup>	

- Metoda fosfátování – způsob chemické předúpravy, při kterém se na povrchu součásti vytvoří souvislá, dobře zakotvená krystalická vrstva nerozpustných fosforečnanů. Vznik vrstvy je podmíněn reakcí mezi povrchem základního materiálu a fosfátovacím roztokem. Zjednodušeně lze tento proces popsat jako rozpuštění určitého množství povrchové vrstvy a následné vyloučení fosforečnanů díky lokálnímu zvýšení hodnoty pH. Výsledná porézní vrstva je chemicky pevně spojena se základním materiálem. Vytváří dobrou protikorozi ochranu materiálu a zlepšuje přilnavost nátěrové hmoty k povrchu. Fosfátování vhodné pro úpravu hliníkového povrchu se dělí podle druhu fosforečnanů vyloučených v povlaku na:

- Zinečnaté fosfátování (obr. 10) – zajišťuje povrchu velmi dobrou přilnavost nátěrových hmot a dobrou korozní odolnost. Nevýhodou této metody je velké množství procesních kroků (příloha 3) a tvorba poměrně velkého množství kalů, které je nutné odstraňovat. S tím souvisí pravidelné čištění pracovní vany nebo postřikového boxu, a tím je tato metoda náročná i z hlediska údržby.
- Železnaté fosfátování (obr. 11) – v porovnání se zinečnatým fosfátováním procesově jednodušší (příloha 3) a levnější metoda. Nevýhodou



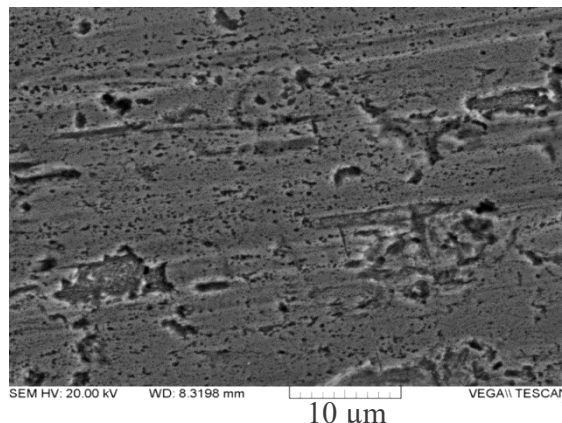
Obr. 10 Struktura povrchu zinečnatého fosfátu [23]

je nižší korozní odolnost. Častou variantou je kombinovaný přípravek sdružující operace železnatého fosfátování a čištění (odmaštění). Povrch hliníku a jeho slitin je však chráněn přirozenou pasivní vrstvou oxidů, která silně zpomaluje, nebo dokonce brání reakci lázně se základním materiálem. Proto je nutné do lázně železnatého fosfátu přidat látky, které zbaví povrch hliníku této pasivní vrstvy.

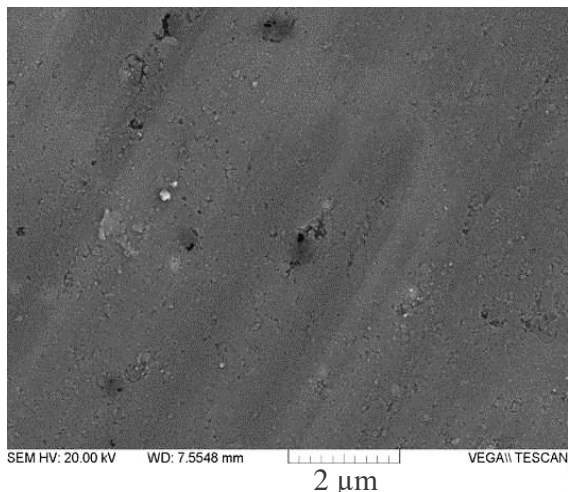
- Metody titan / zirkonium – metody na bázi titanu a zirkonu jsou alternativami k metodám obsahující chrom, případně k fosfátování. Tyto metody jsou na bázi kyselých roztoků, v nichž je rozpuštěn zirkonový nebo titanový komplex. Dalšími látkami v roztoku jsou anorganické nebo organické sloučeniny vytvářející film. Komplexotvorným činidlem je nejčastěji fluorid.

Předpokládaný mechanismus vytvoření konverzní vrstvy má tři základní fáze. Nejprve dojde k mořící reakci, při které se rozpouští povrchová vrstva materiálu součásti. Poté uvolněné hliníkové ionty reagují s vodou i s komplexem přechodového kovu (titan, zirkon). V poslední fázi se díky lokálnímu nárůstu hodnoty pH na povrchu součásti vysráží hydratované vrstvy hliníku a přechodového kovu. Cílem celého procesu je vyloučit na povrchu nerozpustnou krystalickou látku, která zvětší povrch dílce a vytvoří vhodné podmínky pro ukotvení PNH.

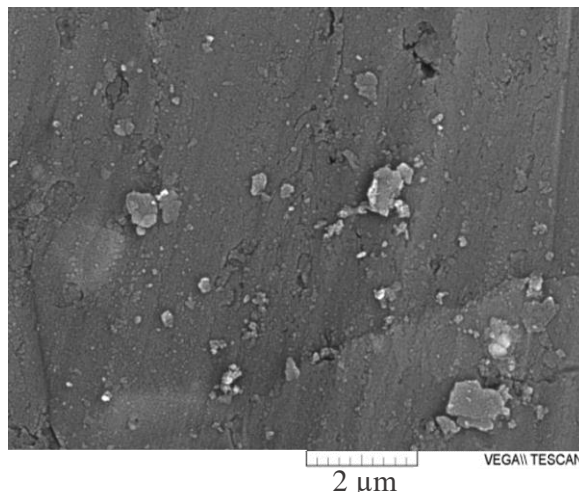
Na obrázku 12 a) je příklad povrchu před nanesením konverzní vrstvy a na obrázku 12 b) struktura povlaku vyloučené konverzní vrstvy založené na bázi zirkonu a trojmocného chromu. Tabulka 5 obsahuje příklady alternativních produktů pro vytvoření konverzní vrstvy od vybraných dodavatelů. V příloze 4 jsou ukázky možných procesních map metody Envirox.



Obr. 11 Struktura povrchu železnatého fosfátu [23]



a)



b)

Obr. 12 Povrch hliníkového materiálu a) před nanesením konverzní vrstvy b) po aplikaci SurTec 609 ZetaCoat [45]

Tab. 5 Alternativní přípravky pro konverzní vrstvy [54, 55, 23, 44, 56, 57, 58, 59, 60].

Výrobce	Metoda	Produkt	Základní kov	Prac. teplota lázně	Doba aplikace	Oplach
				[°C]	[min]	
Alufinish	Envirox S	Alfipas 745 / 746	titan	20 – 30	0,5 – 3	ANO
	Envirox NR	Alficoat 748	titan	20 – 30	0,5 – 3	NE
	Envirox SG	Alfipas 7816	zirkon	20 – 30	0,5 – 2	ANO
SurTec	ZetaCoat	SurTec 609	zirkon, chrom (III)	25 – 35	0,5 – 3	ANO
	No-Rinse	SurTec 640	titan	15 - 30	0,5 - 1	NE
Atotech	Interlox	Interlox 5705	zirkon	20 - 60	4	ANO
HENKEL	Bonderite	Bonderite M-NT 400	titan	20 – 30	0,5 – 3	ANO
	Bonderite	Bonderite M-NT 2040 R2	titan	20 – 30	0,5 – 3	ANO
	Bonderite	Bonderite M-NT 30002	zirkon, chrom (III)	20 – 30	0,5 – 3	ANO
Metalchem Dexter	E-CLPS	E-CLPS 2100QC	titan	20 – 30	0,5 – 2	NE/ ANO
	BULK ZIRCA-SIL	Zirca-Sil 18	zirkon	15 – 35	1 – 5	ANO
	Dexbond	Dexbond SZR	zirkon	15 – 60	2 – 5	ANO

- Anodická oxidace – pre-anodizace hliníku a jeho slitin se používá jako konverzní úprava povrchu před práškovým lakováním pro dosažení vyšších korozních vlastností a to především v přímořských oblastech. Doporučené procesní kroky dle GSB International pro anodickou oxidaci hliníku a jeho slitin za tímto účelem jsou v příloze 5.

Anodická oxidace (eloxování) je komplexní proces, při kterém cíleně vzniká oxidická vrstva na povrchu neželezných kovů. Po čištění (odmaštění) následuje alkalické moření. Po moření je zpravidla zařazen proces vyjasnění, který probíhá ve zředěné kyselině dusičné, resp. sírové. Vyjasnění slouží k odstranění v alkalické lázni nerozpustných příměsových prvků a nečistot, které po moření zůstanou na povrchu v podobě tmavé vrstvy. Dále aktivuje hliníkový povrch pro další povrchovou úpravu. Po procesu vyjasnění následuje vytvoření anodicky oxidované vrstvy nejčastěji v roztoku kyseliny sírové za působení stejnosměrného proudu.

Vrstva vytvořená anodickou oxidací má před samotným nanášením nátěrové hmoty neutěsněné póry, které mohou být příčinou vzniku neshod a v krajním případě i koroze. Do prostoru póru se mohou dostat jemnozrnné částice nebo vlhkost, které mohou být následně



zalakovány a způsobit vady v PNH. Pro prevenci neshod je vhodné nanášet nátěrovou hmotu ihned po procesu předúpravy povrchu.

Chromátovací a fosfátovací metody patří mezi velmi účinné pasivační prostředky. Fosfátování však vyžaduje nákladné zpracování odpadních vod, které obsahují zejména velké množství fosforečnanů, příp. dusičnanů, zinku, niklu, manganu apod. Používání chromátových vrstev je omezeno z důvodu negativních vlastností šestimocného chromu a jeho sloučenin, které jsou toxické a nebezpečné jak pro člověka, tak pro životní prostředí. Použití šestimocného chromu je dnes velmi omezeno (povolení pro jeho používání má např. letecký průmysl). Díky tomu se velké množství firem, vyrábějících prostředky pro chemickou předúpravu hliníku, začalo zabývat vývojem alternativních technologií (např. metoda titan/zirkonium). Alternativní technologie snižují dopad na životní prostředí, snižují riziko poškození zdraví a přinášejí úspory, díky nižšímu obsahu chemikálií používaných při předúpravě a čištění odpadních vod. Nízké pracovní teploty lázní snižují náklady na elektrickou energii. Tyto výhody jsou však kompenzované vyššími náklady na monitorování procesu.

### 2.3 Elektrostatická aplikace PNH [29], [62], [63], [64], [65], [68]

Základní myšlenka elektrostatického práškového lakování je založena na principu přitažlivosti opačně nabitých částic. To znamená, že elektricky nabitě částice nátěrové hmoty putují k opačně polarizovanému povrchu.

Elektrostatické nanášení práškové barvy zahrnuje zásobovací a nabíjecí systém. Aplikační jednotka má několik základních součástí:

- podávací zásobník,
- aplikační pistole (Corona / Tribo),
- distribuční zařízení,
- elektrostatický zdroj energie,
- stříkací kabina,
- jednotka pro recyklaci prášku.

Elektrostatické nanášení práškové barvy začíná fluidizací. Ve spodní části podávacího zásobníku je porézní dlaždice, která odděluje malou vzduchovou komoru od hlavního tělesa nádoby. Stlačený vzduch přiváděný do této komory proudí přes porézní dlaždici a mísí se s práškem v podávacím zásobníku. Proces mísení prášku se vzduchem se nazývá fluidizace, která pomáhá prášek homogenizovat, odstraňovat z něj vlhkost a zajišťovat mu snadno transportovatelnou konzistenci. Díky fluidizaci je možné prášek čerpat ze zásobníku a přivádět jej do stříkací pistole. Stříkací pistole je navržena tak, aby práškovému materiálu dodávala elektrostatický náboj a nasměrovala jej k uzemněné součásti. Náboj může být přenášén buď napětím – Corona nabíjení, nebo třením – Tribo nabíjení.

Když je prášek řádně fluidizován, materiál v násypce stoupá a jeho povrch připomíná vodu při nízkém bodu varu (obr. 13). Zásobník prášku musí být odvětráván, aby se zamezilo zvýšení tlaku v násypce. Čerpací zařízení pracuje na principu Venturiho čerpadla. Stlačený proud vzduchu prochází Venturiho čerpadlem a vytváří tzv. sifonový efekt. Výsledné vakuum čerpá prášek z podávacího zásobníku do stříkací pistole. Druhý proud vzduchu (obr. 14), který je přiváděn do pistole, se mísí s nasátým práškem a dodává



Obr. 13 Fluidizace práškové barvy RAL 3015

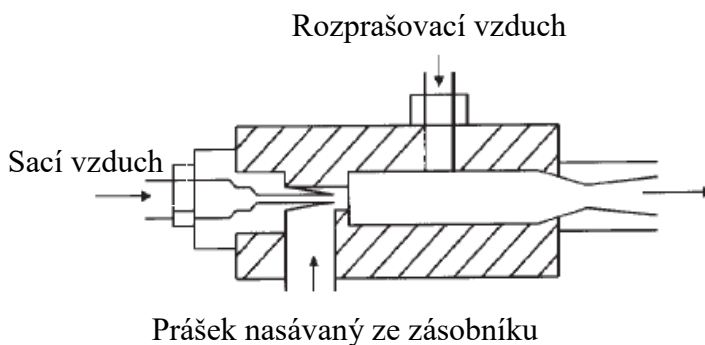
mu transportní rychlost. Vedle fluidizačního tlaku, rovnováhy průtokových a atomizačních ovládacích prvků hraje Venturiho čerpadlo hlavní úlohu při zajišťování rovnoměrného proudění prášku do pistole.

Nabíý prášek je přemisťován směrem k uzemněné součásti proudem stlačeného vzduchu dodávaného do pistole, příp. prouděním vzduchu ve stříkací kabině. Pomocí elektrostatické přitažlivosti mezi nabitými

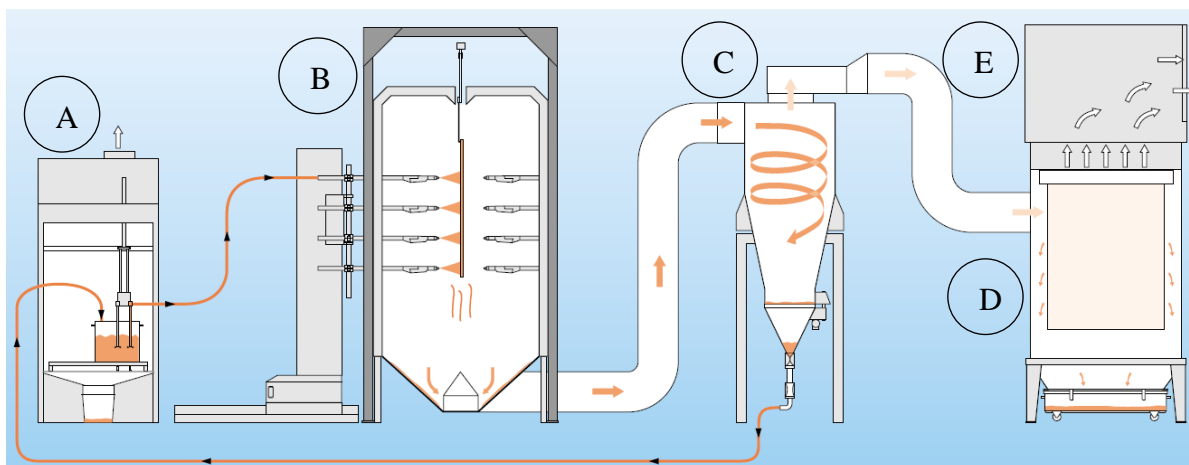
částicemi prášku a uzemněnou součástí přilne prášek k jejímu povrchu. Po nanesení prášku proběhne vypálení PNH v peci, kde se prášek roztaví, zesítuje a následně vytvrdí.

Přebytečný prášek je zachycován v recyklačním systému (obr. 15) pro opětovné použití nebo likvidaci. Recyklační systémy mají zpravidla primární a sekundární (koncový) filtr. Ventilátorem je přebytečný prášek ze stříkací kabiny dopraven do primárního filtru, kde se oddělí od vzduchu. Částice, které prošly primárním filtrem, se odstraní v koncovém filtru. Přefiltrovaný vzduch je poté možné vracet zpět do prostoru haly. Separovaný prášek může být pro odstranění nečistot proséván a poté dopravován zpět do zásobníku automaticky, příp. ručně.

Nejčastějšími recyklačními systémy jsou cyklony a pásové, kazetové nebo modulární filtry. Každý typ filtračního systému má své výhody, které závisejí na druhu aplikace. Hlavními kritérii jsou prostor, požadavky na změnu barvy, vzduchové hospodářství, využití prášku apod.



Obr. 14 Princip Venturiho čerpadla [63]



A – Podávací zásobník

B – Stříkací kabina

C – Cyklon pro recyklaci vzduchu

D – Koncový filtr

E – Odsávací ventilátor

Obr. 15 Cyklus prášku [62]

### 2.3.1 Práškové barvy [62], [63], [68]

Na trhu je velké množství práškových barev, které mají různý vzhled a vlastnosti. Volba typu práškové barvy závisí především na účelu použití (ochrana proti atmosférické či chemické korozi, elektrická nebo tepelná izolace, dekorativní povrch, potravinářský či farmaceutický průmysl apod.).

Práškové barvy jsou jemně namleté plastové částice, které se skládají z 50 – 60 % pojiva, pryskyřice a tvrdidla, 40 – 50% pigmentu a nabíjecích částic a 1 – 2% dalších přísad. Jednotlivé složky práškové barvy jsou smíchány dohromady. Dobře promíchaná směs je poté extrudována a nalámána na vločky, které jsou ve finální fázi procesu rozemleté na prášek.

Práškové barvy mohou být vyrobeny z termoplastů nebo z reaktoplastů. V tabulce 6 a v tabulce 7 jsou uvedeny jejich nejběžnější zástupci spolu se základními vlastnostmi a nejčastějším použitím.

Tab. 6 Vlastnosti a použití vybraných práškových barev z termoplastů [62], [63], [68].

Vinylové	Vlastnosti	Dobrá chemická odolnost, odolnosti proti vodě, trvanlivost.
	Použití	Koše myček na nádobí, police chladniček, vybavení dětských hřišť apod.
Nylonové	Vlastnosti	Houževnatost, chemická odolnost, odolnost vůči rozpouštědlům a otěru.
	Použití	Části nákladních automobilů, potravinářský a farmaceutický průmysl, nákupní vozíky, regály apod.
Polyesterové	Vlastnosti	Dobrá adheze k základnímu materiálu, odolnost vůči UV záření a povětrnostním podmínkám, v porovnání s nylonovými PNH horší odolnost vůči otěru nebo rozpouštědlům.
	Použití	Venkovní aplikace (např. terasový nábytek) apod.

Tab. 7 Vlastnosti a použití vybraných práškových barev z reaktoplastů [62], [63], [68].

Epoxidové	Vlastnosti	Houževnatost, korozní (po speciální úpravě) i chemická a tepelná odolnost, nemají dobrou odolnost proti UV záření.
	Použití	Interiérové aplikace, dekorativní aplikace, elektrická izolace.
Hybridní (epoxid – polyester)	Vlastnosti	Kombinují vlastnosti epoxidových a polyesterových prášků, oproti epoxidovým typům jsou odolnější vůči UV záření, méně odolné proti chemikáliím a rozpouštědlům.
	Použití	Interiérové použití, ale je možné i krátkodobé vystavení povětrnostním podmínkám.
Polyuretanové	Vlastnosti	Velmi stabilní, odolné vůči chemikáliím, rozpouštědlům a povětrnostním vlivům.
	Použití	Automobilová kola, obložení, vybavení dětských hřišť apod.
TGIC polyesterové	Vlastnosti	Velmi dobré adhezni vlastnosti, odolnost proti korozi a povětrnostním vlivům.
	Použití	Venkovní nábytek, zemědělské stroje, klimatizační zařízení, plotové sloupky, architektonické obložení apod.
Akrylové	Vlastnosti	Chemická odolnost, vysoká přilnavost a krycí schopnost, barevná stálost, odolnost proti otěru.
	Použití	Automobilový průmysl, pračky, lednice apod.

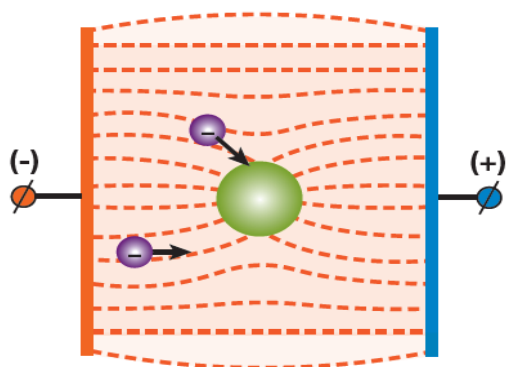
### 2.3.2 Corona nabíjení [63], [67]

Nabíjecí systém Corona je nejrozšířenějším typem elektrostatického nanášení PNH. K nabití částic prášku slouží pistole, do které je ze zásobníku dopravován prášek pomocí Venturiho čerpadla. Ve špičce pistole je umístěná nabíjecí elektroda, která je připojena na generátor vysokého napětí (30 – 100 kV). Obvykle se u metody Corona používá elektroda se zápornou polaritou, která generuje větší počet iontů za působení menšího oblouku.

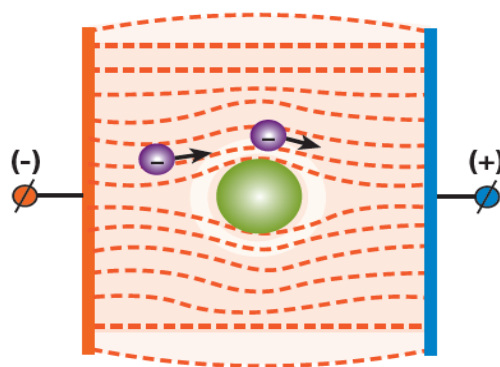
V okolí pistole jsou vždy přítomné volné elektrony a ionty. Po spuštění nabíjení se vytvoří nehomogenní elektrické pole mezi špičkou pistole a uzemněnou součástí. Pokud projdou volné elektrony silným elektrickým polem, začnou se urychlovat podél jeho siločar a srážet se s molekulami vzduchu.

Jestliže síla elektrického pole přesáhne pevnost vzduchu, dojde na špičce pistole ke korónovému výboji. Dopad volných elektronů na molekuly vzduchu je dostatečně silný k tomu, aby molekulu rozštěpil na dva sekundární elektrony a jeden pozitivní iont. Sekundární elektrony jsou urychlovány v elektrickém poli podél siločar a opakují proces štěpení molekul vzduchu. Výsledné negativní ionty jsou urychlovány směrem k uzemněné součásti, zatímco pozitivní ionty se pohybují opačným směrem k nabíjecí elektrodě pistole. Ihned po vzniku korónového výboje je prostor mezi nabíjecí pistolí a uzemněným výrobkem vyplněn velkým množstvím iontů a volných elektronů.

Nenabitá částice práškové hmoty, která se nachází v externím elektrickém poli (pistole – uzemněná součást), deformuje směr siločar, viz obrázek 16. Volné, zpravidla negativní ionty sledují směr siločar a „bombardují“ práškovou částici do té doby, dokud nezíská maximální náboj. Negativně nabitá částice vytvoří své vlastní el. pole, které odkloní siločáry externího el. pole od svého povrchu. Volné ionty poté nabitou částici míjí, viz obrázek 17. Velikost nabití částic PNH je závislé zejména na síle el. pole, na velikosti a tvaru částice a na čase stráveném v nabíjecím prostředí.



Obr. 16 Nenabitá částice PNH [67]



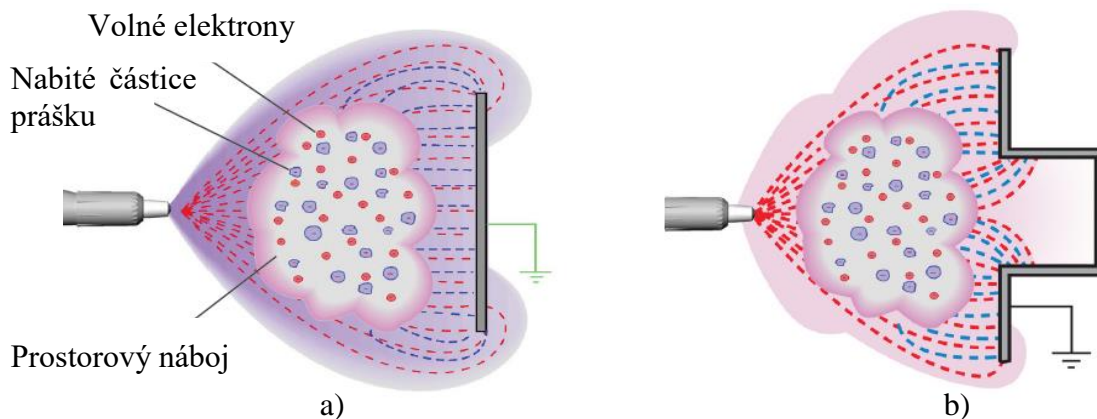
Obr. 17 Nabitá částice PNH [67]

Nabitá prášková částice je unášena proudem vzduchu a urychlována elektrickým polem směrem k uzemněné součásti, která představuje přijímací elektrodu. Částice po přiblížení k uzemněné součásti přilne vlivem přitažlivých sil na její povrch. Jakmile nabitá částice dosáhne uzemněného povrchu součásti, vytvoří se stejně velký (zrcadlový) náboj opačné polarity uvnitř materiálu.

Negativním dopadem silného el. pole vytvořeného metodou Corona je vznik efektu Faradayovy klece při nanášení PNH na součást s tvarově složitější geometrií (zhloubení, žlábků, rohy apod.). Siločáry mají tendenci se koncentrovat na hranách vybrání v důsledku menšího odporu (obr. 18). Nabité částice sledují dráhu siločar, proto se prášek v těchto místech usazuje mnohem intenzivněji, a naopak mnohem hůře uvnitř rohů a vybrání. Jedním z možných řešení snížení vlivu Faradayova jevu je použití protielektrody, která pohltí ionty produkované elektrodou a odstíní tím siločáry mimo uzemněnou součást.



Mezi hlavní faktory, které mají vliv na kvalitu výsledné vrstvy, patří: vzdálenost a potenciální rozdíl napětí mezi pistolí a uzemněnou součástí, druh elektrody a trysky, rychlost prášku a tvar výrobku. Metoda Corona je, na rozdíl od metody Tribo, vhodná pro nanášení širokého spektra práškových barev.

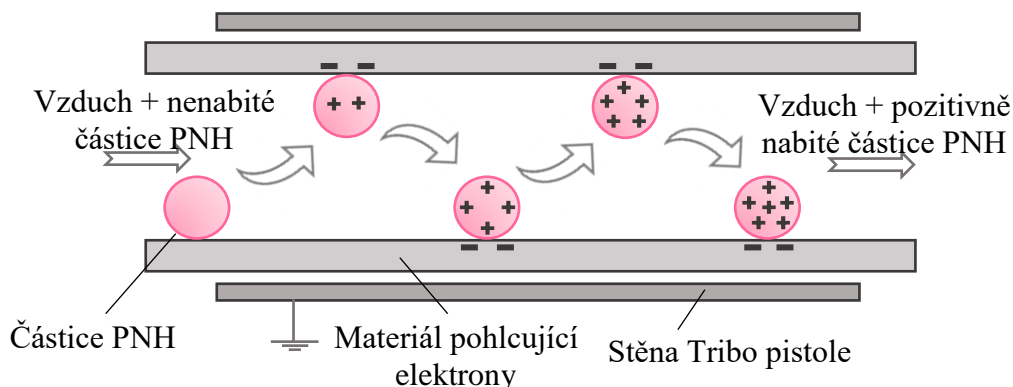


Obr. 18 Závislost tvaru elektrostatičkého pole na tvaru součásti  
a) homogenní plocha, b) tvarová součást [67]

### 2.3.3 Tribo nabíjení [62], [63], [66], [68]

Při použití metody Tribo se částice PNH nabíjí pomocí mechanického tření o vnitřní povrch pistole. Stejně jako u metody Corona je směs práškové nátěrové hmoty a vzduchu nasávaná pomocí Venturiho čerpadla do práškové pistole. Částice prášku se třou o vnitřní povrch pistole, který je vyroben z materiálu schopného pojmout velké množství elektronů (teflon). Při tření o stěnu pistole jsou částice odebírány elektrony, a tím se velikost kladného náboje na jejím povrchu zvětšuje, viz obrázek 19. Uvnitř pistole dochází k víření vzduchu (turbulenci), což zvyšuje počet nabíjecích kontaktů. Negativní náboj je z pistole okamžitě odveden k zemi skrz zemnicí kabel. Nabité částice jsou dopravovány k uzemněné součásti proudem vzduchu z pistole. Vzhledem k tomu, že rychlost plnicího vzduchu není na výstupu z pistole dostatečně velká, zvyšuje se její rychlost pomocí dodatečného (transportního) proudu vzduchu.

K odtržení elektronu je zapotřebí velké množství energie, a je tedy zapotřebí proces tření opakovat. Velikost nabití se zvětšuje s počtem kontaktů s teflonovým povrchem pistole. Proto jsou pistole používané pro metodu Tribo obecně delší a průtok prášku je omezený. Třením je dodán prášku rovnoměrný náboj a vysoká přenosová účinnost.



Obr. 19 Princip metody Tribo [68]

Práškový materiál, vhodný pro aplikaci Tribo nabíjením, se vyznačuje dobrými vlastnostmi předávat elektrony, jako je nylon nebo epoxid. Ne každý materiál je vhodný pro aplikaci

metodou Tribo. Důležitá je také velikost částic. Obecně platí, čím větší má částice velikost, tím je větší kontaktní plocha a i náboj.

Velkou výhodou metody Tribo je překonání nevýhody metody Corona, kterou je Faradayova klec. Nabíjecí pistole produkuje velmi malé množství volných iontů do okolí. Mezi pistolí a uzemněnou součástí nevzniká silné elektrické pole a prostorový náboj je zde zanedbatelný. Proto je mnohem snazší nanést práškovou nátěrovou hmotu i na tvarově složité dílce.

Při nabíjení metodou Tribo nehrozí vznik zpětné ionizace, která vzniká u Corona metody se zvětšujícím se elektrickým polem uvnitř vrstvy, tzn. okamžik, kdy nastane ionizace molekul vzduchu zachycených mezi částicemi prášku. Proto je tato metoda vhodná pro nanášení vrstev o větších tloušťkách a pro aplikaci druhých vrstev (přelakování). Dále je tato metoda Tribo vhodná pro nanášení PNH na tvarově složité dílce bez vytvoření nadměrně velké vrstvy na hranách a na okrajích vybrání. Díky tomu, že nabíjecí pistole produkuje velmi malé množství volných iontů, lze touto metodou dosáhnout jednotné a hladké vrstvy. Omezujícími faktory jsou u této metody chemické složení práškové nátěrové hmoty, která musí být vhodná k nabíjení třením, a velikost jejích částic.

### 2.3.4 Vytvrzování PNH [62], [63], [68], [69], [70], [71], [72]

Po nanesení PNH se výrobky přesouvají do vypalovací (vytvrzovací) pece. Prášek vlivem zvýšené teploty začne tát, poté chemicky reagovat a následně vytvoří síťovou strukturu (vytvrdí se). Pro dosažení úplného vytvrzení (zasítování) a všech požadovaných vlastností vrstvy je nutné dodržet správnou teplotu a čas tepelného zpracování.

Na zvolení správné teploty a času expozice nalakovaného dílce v peci má vliv především jeho tloušťka stěn, tepelná vodivost a tvarová složitost dílu. Dalším velmi důležitým faktorem je i průběh nárůstu teploty na povrchu dílce a rozložení teplot v peci. Na dodržení správného procesu vypalování závisí přilnavost povlaku k základnímu materiálu, elasticita a další vlastnosti povlaku, jako jsou například lesk, mat, drsnost apod.

Pece se dle způsobu vypalování práškové nátěrové hmoty dělí do tří základních skupin:

- Horkovzdušné (konvenční) pece – nejpoužívanějším typem pro vypalování práškových nátěrových hmot. Vytvrzování PNH probíhá za cirkulace teplého vzduchu, který předává teplo povrchu dílce. Dle topného média se pece dělí na plynové, elektrické a LTO (lehké topné oleje). Plynové pece se dále dělí na pece s přímým ohřevem a s nepřímým ohřevem.
- Infračervené pece – využívají elektrickou energii k přímému způsobu vytápění. Na rozdíl od konvenčních horkovzdušných pecí nevyžadují žádné médium pro přenos tepla. To znamená, že se neohřívá vzduch uvnitř pece, ale přímo povrch nalakovaných součástí. Díky tomu je vypálení práškové barvy rychlejší než u pecí horkovzdušných.  
Podle zdroje infračerveného záření se pece dělí na elektrické a katalytické (nižší provozní náklady). Infračervené katalytické pece jsou čistší, nákladově efektivnější a účinnější než konvenční pece. Tyto pece nejsou vhodné pro tvarově složité součásti, kde tvar součástí může v některých místech omezit dopad infračervených paprsků. Infračervená katalytická pec používá jako médium zemní plyn nebo propan.
- Ultrafialové pece – jejich použitím lze zkrátit čas vypalování. Proces vypalování lze rozdělit do dvou fází: Nejprve se nanesená vrstva práškové barvy předežhřívá pomocí horkovzdušné, příp. infračervené pece na teplotu 100 °C. Během tohoto procesu se začne prášek tavit a rozlévat. Poté se povrch ozáří ultrafialovým světlem, které způsobí jeho vytvrzení.  
Výhodou tohoto typu pece je nejen rychlost vytvrzení práškové barvy, ale i nízká teplota vytvrzování a rychlé chladnutí. Nevýhodou je nutnost použití speciálních práškových nátěrových hmot s obsahem fotoiniciátorů, které umožňují okamžité zasítování pryskyřice.

### 3 NANÁŠENÍ STŘÍBRA NA HLINÍK A JEHO SLITINY [17], [73], [74]

Stříbro je bílý kov s poměrně malou mechanickou pevností. Velmi významnou vlastností stříbra je jeho výborná elektrická a tepelná vodivost, díky které se používá zejména v elektronice a elektrotechnice. Nicméně hliník má mnoho vlastností, které brání vytváření kvalitního kovového povlaku na jeho povrchu. Mezi tyto vlastnosti se řadí vysoká afinita hliníku ke kyslíku, v důsledku čehož je ve vodném prostředí jeho povrch rychle pokryt oxidovou vrstvou, a vysoký negativní potenciál aktivovaného povrchu podporuje oddělení kontaktního kovu. Důsledkem negativního potenciálu hliníku po jeho aktivaci je koroze kovu v elektrolytech doprovázená tvorbou porézního, často práškovitého, kontaktního nánosu, ke kterému nemá dále elektrolyticky vylučovaný povlak dostatečnou přilnavost. Za další škodlivé faktory pro tvorbu kovového povlaku na povrchu hliníku lze považovat řadu fyzikálně-mechanických vlastností, jako je rozdíl mezi koeficienty tepelné roztažnosti hliníku a kovů na něm uložených, rozdíl mezi krystalovými mřížkami hlavního kovu a uložené vrstvy. Proto se pro zlepšení přilnavosti povlaku stříbra k hliníkovému podkladu volí vhodná předúprava povrchu, po které často následuje nanášení kovové mezivrstvy (měď, nikl).

#### 3.1 Předúprava povrchu [30], [74], [75], [76], [77]

Předúprava povrchu před nanesením stříbra má stejný důvod jako před nanesením PNH: očištění a vytvoření vhodné kotvící plochy. Volba způsobu předúpravy povrchu před nanesením vrstvy stříbra závisí na různých kritériích, mezi které patří zejména chemické složení slitiny hliníku, drsnost povrchu, konstrukční složitost součásti, technologie následného procesu tvoření mezivrstvy, druh kontaminace apod. Úspěch konkrétního zvoleného procesu je dán tím, do jaké míry jsou v jeho jednotlivých krocích zohledněny specifické vlastnosti hliníku a změny vlastností při přechodu z jedné slitiny na jinou. Navrhované metody pro přípravu hliníku před nanesením povlaku stříbra jsou následující:

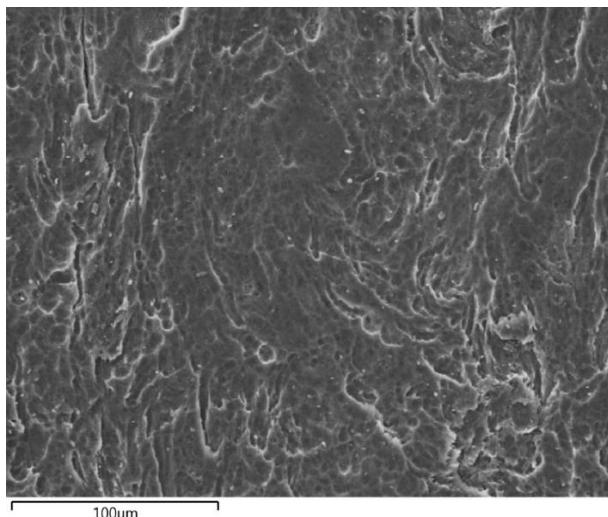
- Uložení povlaku na zdrsňelý povrch – zdrsněním povrchu se zvyšuje přilnavost kovové vrstvy k podkladovému materiálu. Lze jej provést mechanicky, chemicky i elektrochemicky. Principem je mechanické uchycení (ukotvení) nanášené vrstvy k podkladu. Obecně platí, že spolehlivost mechanické vazby při elektrolytickém povlakování je nízká, zvláště pro aplikace, které jsou ovlivňované změnami teplot. Nicméně zdrsnění povrchu se často používá jako pomocná operace při přípravě povrchu součásti před jiným způsobem předúpravy a může být provedeno následujícími způsoby:
  - Tryskání směsi vody a jemné křemičité mouky – může být použito k odstranění povrchových oxidů a k obroušení povrchu. Přilnavý vlhký film chrání hliníkový povrch před další oxidací před pokovením. Křemenný film je následně z povrchu uvolněn během pokovování díky uvolňování vodíku. Další způsoby mechanické předúpravy povrchu jsou popsány v kapitole 2.1.
  - Moření – slouží k odstraňování anorganických látek z povrchu součásti a zvětšuje jeho styčnou plochu, která umožňuje mechanické zakotvení následně nanesené kovové vrstvy. Moření a s ním související i čištění (odmaštění) hliníku a jeho slitin je popsáno v kapitole 2.2.1 a 2.2.2.
  - Elektrochemické anodové leptání – obvykle se provádí v chloridových roztocích, někdy s přidávkou jiných solí a kyselin. V porovnání s chemickým leptáním zajišťuje elektrochemické anodové leptání větší množství naleptaných míst a větší jednotnost leptání.
- Uložení povlaku na film kontaktního kovu – ukládání fólie kontaktního kovu před nanesením kovového povlaku na hliník pracuje na principu ponoření součásti do roztoku obsahujícího kladné ionty tohoto kovu. V důsledku působení korozivních složek roztoku se

aktivuje povrch hliníku, korozní potenciál se posune v negativním směru a dojde k reakci, při které vznikne tenká kompaktní fólie sloužící jako základna pro chemické i galvanické pokovení.

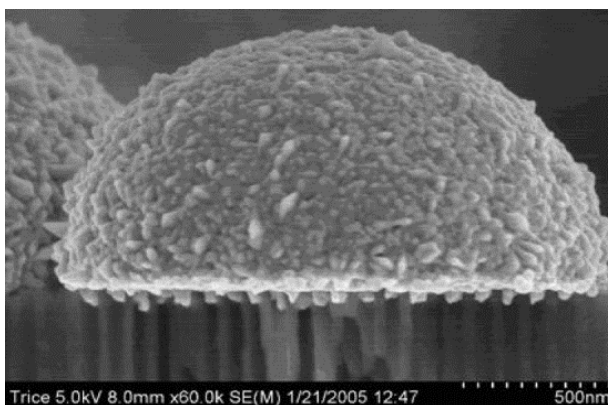
Zinkátování (obr. 20) je jedním z nejčastějších procesů ukládání kovového kontaktního povlaku. Tento komplexní proces je stabilní, jednoduchý a ekonomicky výhodný. Zpravidla mu předchází čištění (odmaštění), moření a vyjasnění. Výsledkem je vytvoření tenké (cca  $0,1\mu\text{m}$ ), dokonale přilnavé a mechanicky odolné vrstvy zinku, která může být pokovena elektrolyticky i chemicky mědí, niklem, stříbrem apod.

Principem zinkátovacího procesu je ponoření hliníkového výrobku do alkalického roztoku, ve kterém se aktivuje jeho povrch. Dojde k nahrazení iontů hliníku ionty zinku a vytvoření kontaktního filmu zinkátu. Přilnavost vytvořené vrstvy téměř výhradně závisí na kovové vazbě mezi zinkem a hliníkem.

- Uložení povlaku na oxidový film – anodizace je jednou z možných úprav povrchu před elektrolytickým pokovením. Lze použít vodný elektrolytický roztok kyseliny fosforečné (možný sled operací je v příloze 6). Přilnavost kovové vrstvy je však omezená. Nanesené vrstvy jsou velmi citlivé na povrchové neshody, které jsou způsobeny nedodržením pracovních parametrů procesu (doba expozice, teplota lázně a proudová hustota). Obrázek 21 ukazuje zaplnění buňkové struktury oxidu hliníku galvanickým povlakem a počátek spojování do kompaktního povlaku.



Obr. 20 Struktura vrstvy zinkátu na hliníkovém podkladu.



Obr. 21 Zaplnění buňkové struktury galvanickým povlakem [98]

### 3.2 Elektrolytický způsob tvoření mezivrstvy [29], [73], [75]

Mezi základní pojmy elektrolytického způsobu tvoření kovové vrstvy patří především elektrická vodivost a elektrolyza. Elektrickou vodivost lze definovat jako schopnost látky vést elektrický proud. Tuto schopnost mají také roztoky elektrolytů. Elektrolyt je látka, jejíž molekuly se v roztoku štěpí na ionty. Rozpuštěním elektrolytu ve vodním rozpouštědle vznikne roztok elektrolytu.

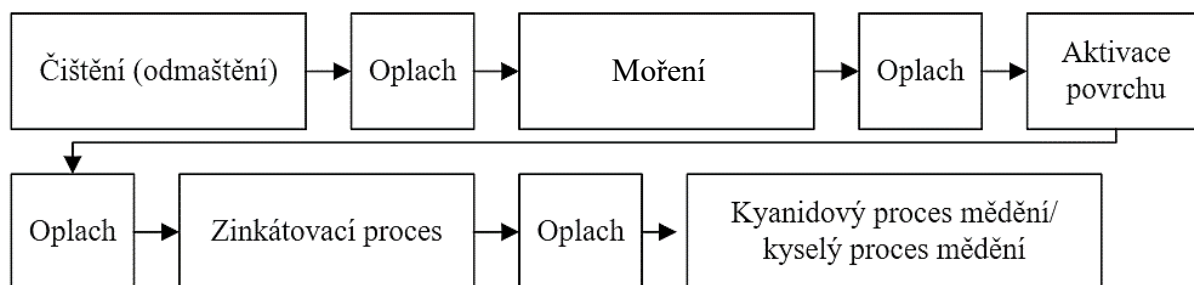
Elektrolýzu lze definovat jako přeměnu elektrolytu elektrickým proudem. Při ní probíhají na elektrodách redukční a oxidační pochody. Přenosem nábojů mezi roztokem elektrolytu a elektrodou vzniká elektrický proud. Na elektrodě může probíhat buď katodická (redukční) reakce, nebo anodická (oxidační) reakce. Podle druhu reakce je definován pojem katoda a anoda.

Rozpuštěním anorganické soli ve vodě se zruší její krystalická mřížka a nastává disociace elektrolytu, při níž vzniknou volně se pohybující ionty (obr. 27). Záporné ionty uvolněné elektrolytickou disociací nesou přebytečné elektrony a kladně nabitě ionty mají elektronů nedostatek. Pomocí elektrod je do roztoku elektrolytu zaveden stejnosměrný elektrický proud. Anodou je v elektrolytických lázních rozpustná elektroda, kterou vchází proud do roztoku elektrolytu a je připojená ke kladnému pólu zdroje stejnosměrného proudu. Anoda je ve většině případů vyrobená z kovu, kterým se pokovuje povrch součástí. V některých případech se používají interní nerozpustné elektrody (např. při chromování). Jako katoda jsou zapojeny pokovované díly, které jsou připojené k zápornému pólu zdroje energie.

Jestliže při elektrodové reakci přechází kladný náboj z roztoku do elektrody nebo záporný náboj z elektrody do roztoku, vzniklý proud se označuje jako katodický a probíhá katodická reakce. Příkladem je vylučování mědi z roztoku iontů  $\text{Cu}^{2+}$ , kde kladně nabitý iont  $\text{Cu}^{2+}$  přechází na elektrodu, na níž se redukuje na atom Cu a zabudovává se do krystalické mřížky.

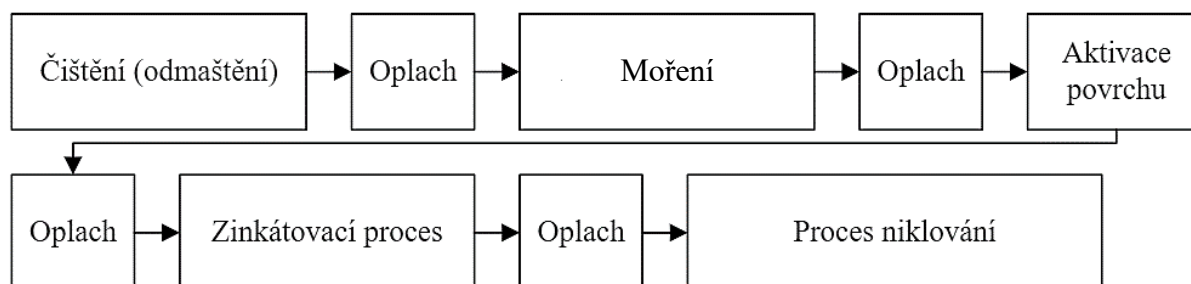
Pokud naopak při elektrodové reakci přechází záporný náboj z roztoku do elektrody nebo kladný náboj z elektrody do roztoku, nazývá se vzniklý proud jako anodický a probíhá anodická reakce. Například oxidační reakce probíhá při oxidaci materiálu měděné elektrody za vzniku hydratovaných iontů  $\text{Cu}^{2+}$  v roztoku.

Jako mezivrstva mezi hliníkovým povrchem a vrstvou stříbra se z elektrolytický vyloučených povlaků velmi často používá měděný povlak. Vlastnosti vyloučených měděných povlaků závisí na druhu použité lázně a na jejím složení. Základní dělení mědicích lázní je na kyselé a kyanidové alkalické lázně. S důrazem na ochranu zdraví a životního prostředí se v poslední době začal zkoumat vývoj alkalických bezkyanidových systémů, které se v mnoha aplikacích používají jako náhrada za kyanidové systémy. Z kyselých lázní se převážně vylučují hrubozrnné a měkké povlaky, naopak z alkalických kyanidových lázní se společně za vzniku vodíku vylučují zpravidla jemnozrnné povlaky. Jeden z možných procesů mědění je na obrázku 22.



Obr. 22 Procesní kroky elektrolytického mědění [78]

Elektrolytické vyloučení vrstvy niklu je další možný způsob vytvoření mezivrstvy na hliníkovém podkladu. Jeden z možných procesů niklování je na obrázku 23. Povlaky niklu se vyznačují značnou odolností proti působení atmosférických vlivů i vody. Díly s povlakem niklu jsou odolné proti opotřebení a při dostatečné tloušťce mají velmi vysokou odolnost proti korozi.

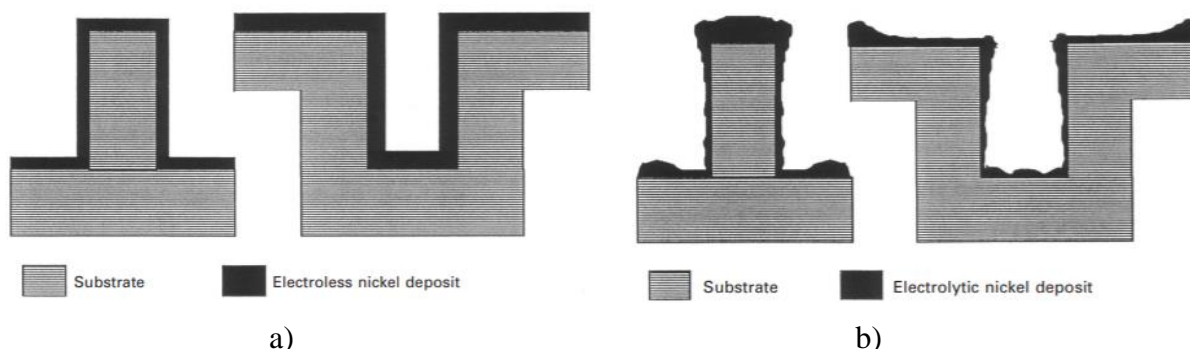


Obr. 23 Procesní kroky elektrolytického niklování [78]

Pro elektrolytické vylučování niklových povlaků se zpravidla používají kyselé lázně (síranového, chloridového typu). Porovnání hustoty, teploty tavení, elektrické vodivosti a el. odporu niklu s mědí je v příloze 7 (tab. 41).

### 3.3 Chemický způsob tvoření mezivrstvy [22], [75], [79], [80], [81], [82]

Chemické (bezproudé) pokovování pracuje na principu vylučování ušlechtilějšího kovu na povrchu méně ušlechtilého kovu vlivem rozdílu potenciálů v roztoku, nebo na vyredukování kovu z jeho soli příslušným redukčním činidlem. Výhodou chemického pokovování je absence složitých zařízení, jednoduché pracovní postupy a prakticky neomezená hloubková účinnost lázně, tzn. že lze pokovovat i členité předměty s dutinami. V porovnání s elektrolyticky nanášenými vrstvami (obr. 24 b) se bezproudově vyloučené vrstvy (obr. 24 a) vyznačují mnohem jednotnější a rovnoměrnější tloušťkou povlaku bez ohledu na tvarovou složitost



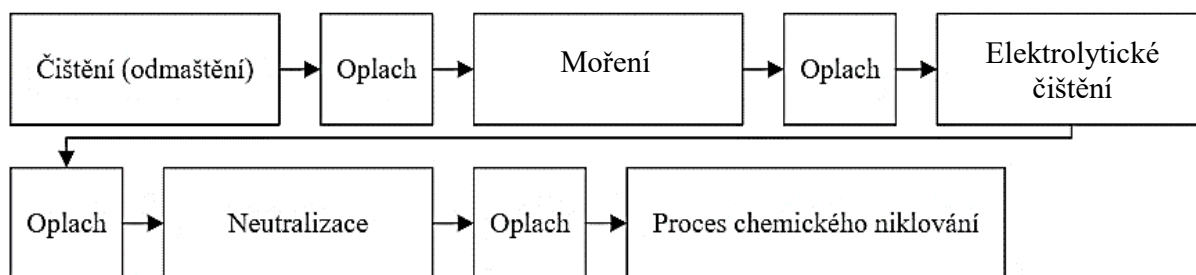
Obr. 24 Vyloučení povlaku a) chemické (bezproudé), b) elektrolytické [79]

výrobku. Naopak nevýhodou je menší vylučovací rychlost a vyčerpatelnost lázní. Z tohoto důvodu je nutné lázeň regenerovat. Chemicky lze kovové povlaky vylučovat těmito způsoby:

- Pokovení výměnou iontů – tento způsob pokovení se také nazývá cementace. Princip spočívá v ponoření základního kovu do roztoku kovových solí, kde probíhá výměna iontů ušlechtilějšího kovu z roztoku za méně ušlechtilý kov pokovovaného základního materiálu.
- Redukční pokovení – přidáním redukčního činidla do roztoku kovové soli se vyredukuje kov, který se vyloučí na povrchu základního materiálu. Vzniklé povlaky mají dobrou přilnavost. Povrch základního materiálu musí být aktivní a dokonale čistý. Mezi nejrozšířenější technologie patří chemické měďění, stříbření a niklování.
- Kontaktní pokovení – principem této metody je umělé vytvoření vnitřního zdroje proudu. Pokovovaný základní kov je vodivě spojen s kontaktním kovem, který musí být méně ušlechtilý než vylučovaný kov obsažený v roztoku. Vznikne galvanický člunek, ve kterém kontaktní kov představuje anodu. Kontaktní kov se rozpouští, ušlechtilější kov je vytěsňován a usazován na pokovovaném ponořeném předmětu.

Velmi rozšířenou technologií je chemické niklování. Pracuje na principu chemické redukce, při které je kov ukládán na povrch součásti za působení redukčního činidla. Výhodou je rovnoměrná tloušťka povlaku i na součástech s komplexním tvarem. Vyloučené vrstvy jsou velmi tvrdé a díky bariérové vrstvě mezi podkladem a okolím poskytují vysokou ochranu proti korozi. Chemické niklování lze provést na jakémkoli materiálu, pokud je katalytický k chemické redukci niklu. Lázně obsahující dihydrido-dioxofosforečnan sodný jsou nejčastějším typem komerčně používaných lázní. Vrstvy vyloučené z těchto lázní obsahují vedle niklu také určité množství fosforu. Na obrázku 25 je jedna z možných procesních map chemického niklování.



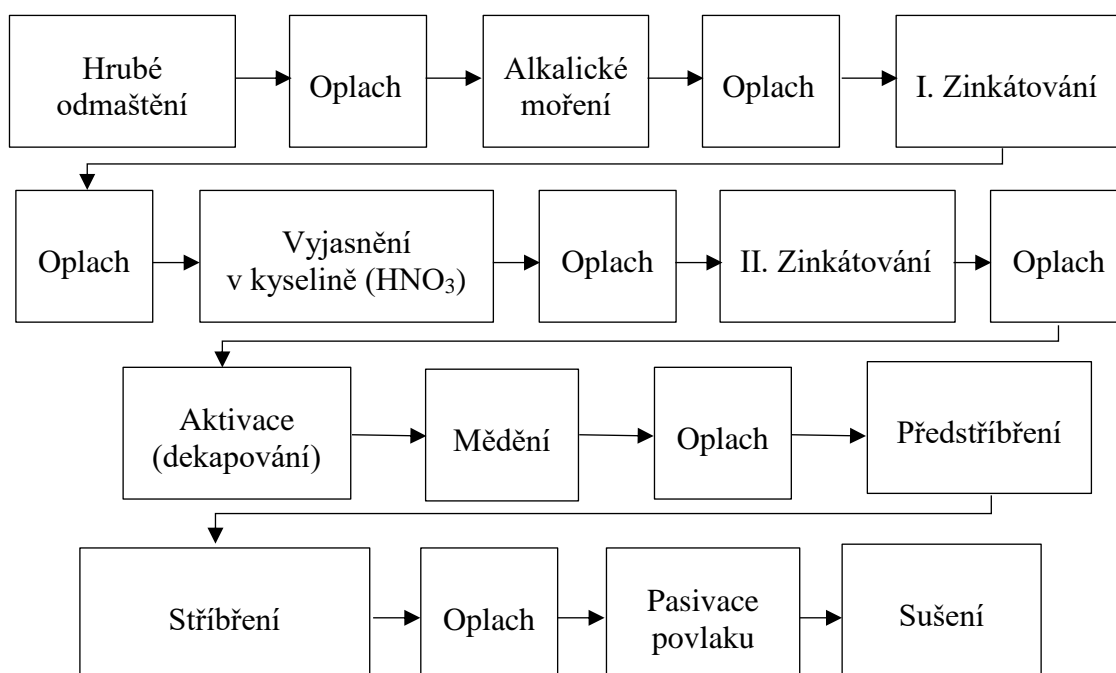


Obr. 25 Procesní kroky chemického niklování [83]

### 3.4 Povlaky stříbra [73], [75], [84], [85], [86], [87], [93], [94], [98]

Povlaky stříbra lze dělit podle způsobu vytvoření vrstvy na:

- Elektrolytické nanášení – dělí se podle povahy lázně na:
  - Alkalické kyanidové lázně – nejčastěji používaný typ pro elektrolytické nanášení. Podle koncentrace stříbra se dělí na lázně pro předběžné stříbření (s obsahem stříbra  $1\text{--}2\text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$ ), na lázně pro dekorativní a technické stříbření (s obsahem stříbra  $5\text{--}40\text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$ ) a na rychle stříbřící lázně (s obsahem stříbra  $40\text{--}75\text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$ ). Nositel kovu v lázni je kyanostříbrnan draselný ( $\text{K}[\text{Ag}(\text{CN})_2]$ ). Lázeň dále obsahuje kyanid draselný ( $\text{KCN}$ ) potřebný k převedení stříbrných solí na kyanostříbrnan draselný a volný kyanid (další množství kyanidu draselného). Volný kyanid rozpouští stříbrné anody a také funguje jako elektrolyt. Dalšími složkami mohou být přísady zvyšující vodivost lázně (uhlíčitany), tvrdost vrstvy (organické sloučeniny síry), zesvětľující přísady (selen, antimon) atd. Výhody kyanidových stříbřících lázní je univerzálnost, spolehlivost, stabilita, vysoká hloubková účinnost, vysoká krycí schopnost a přilnavost povlaku. Nevýhodou je vysoká toxicita lázní, nákladná likvidace odpadních vod, nízká vylučovací schopnost, navodíkování základního materiálu. Na obrázku 26 je příklad zjednodušeného technologického postupu pokovení hliníkového povrchu stříbrem s mezivrstvou mědi.

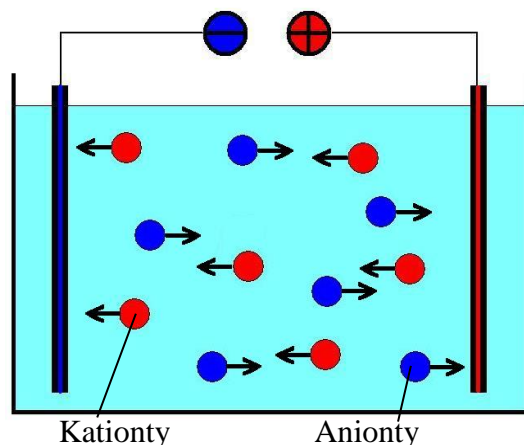


Obr. 26 Zjednodušený proces kyanidového stříbření [98]

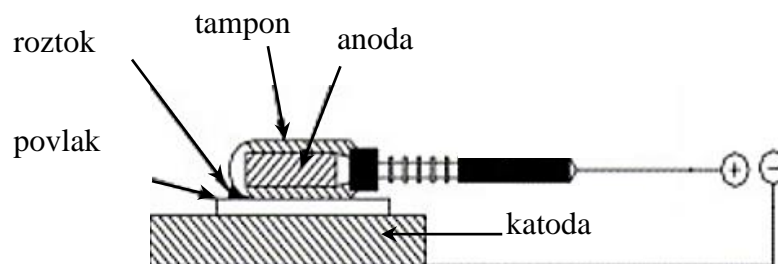
- Bezkyanidové lázně – byly vyvinuty na základě environmentálních a bezpečnostních aspektů. Použitím procesu bez kyanidu se snižuje objem vzniklého nebezpečného odpadu a související náklady na jeho likvidaci. Oproti tradičnímu kyanidovému procesu poskytují bezkyanidové povlaky nižší vizuální kvalitu. Nekyanidové stříbricí lázně mohou být například thiosíranové, difosforečnanové, fosfonátové dále mohou obsahovat například imid kyseliny jantarové nebo dimethylhydantoin.
- Chemické nanášení – princip metody je analogický k chemickému způsobu vytvoření mezivrstvy popsanému v kapitole 3.3, viz redukční pokovení.
- Magnetronové naprašování – uvnitř vakuové komory se nachází terč zvoleného složení a povlakovaný povrch. Terč je zapojen jako katoda. Do vakuové komory je přiváděn pracovní plyn (např. argon). Před terčem je vytvořené magnetické pole, které je vytvořeno permanentním magnetem, na které působí v kolmém směru pole elektrické. Po přivedení napětí vznikne před terčem výboj. Elektrony se pohybují po šroubovici, tím se výrazně prodlouží jejich dráha a doba setrvání v oblasti výboje, a zvyšuje se tak i pravděpodobnost ionizace atomů pracovního plynu. Ionty pracovního plynu bombardují povrch terče, materiál se rozprašuje a je deponován na substrát. Výhodou této metody je velká depoziční rychlost, vysoká adheze vrstev, zachování složení slitinového terče ve stejném poměru jednotlivých složek a homogenní depozice vrstev i na větších plochách. Tato metoda je vhodná pro vytváření tenkých vrstev a dekorativní povlakování.

Podle způsobu nanášení vrstvy se elektrolytické stříbření dále může dělit na:

- Ponorové nanášení povlaku stříbra – klasická metoda, kde katoda i anoda jsou ponořeny do elektrolytu (obr. 27), který se nachází v elektrolyzáru (vaně). Elektrolyza probíhá na celém povrchu pokovované součásti. Plochy, kde se pokovení nevyžaduje, je nutné zamaskovat vhodným maskovacím přípravkem.
- Tamponové (lokální) nanášení povlaku stříbra – od klasické metody se liší pouze v tom, že proces nanášení vrstvy je lokální. Stejně jako u elektrolytického způsobu tvoření kovové vrstvy je pokovovaný předmět připojen jako katoda (obr. 28). Anoda je obalena savým materiálem (tampónem), který pojme a udržuje elektrolyt. Dotykem tampónu se substrátem (katodou) vznikne uzavřený elektrický okruh, kterým prochází stejnosměrný proud a na katodě se vylučuje povlak. Výhodou této metody je možnost pokovení rozměrově složitých dílců, u kterých je obtížné (příp. nemožné) je umístit do stříbricí vany (lázně).



Obr. 27 Galvanické pokovení ponorem [99].



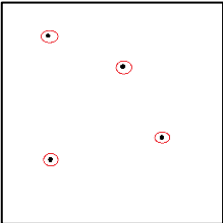
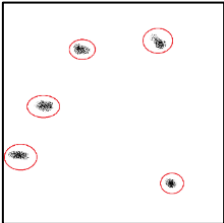
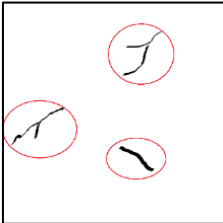
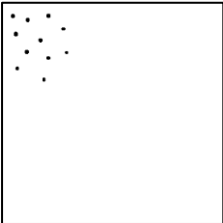
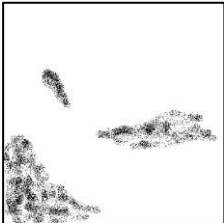
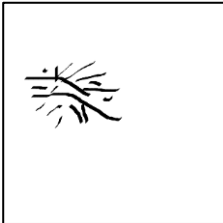
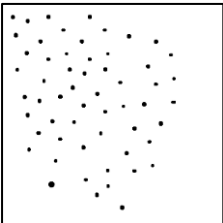
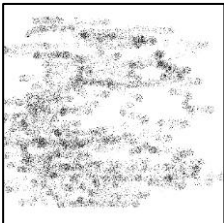

Obr. 28 Princip tamponového nanášení povlaku stříbra [86]






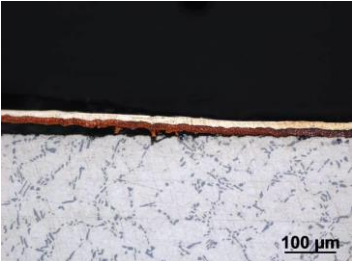
### 3.5 Vady povlaku stříbra [95]

Vady povlaku stříbra mohou mít různý charakter a vizuální podobu. Tabulka 8 uvádí možné rozdělení vad dle výskytu (rozložení) na povrchu. Tabulka 9 uvádí nejčastěji se vyskytující druhy vad.

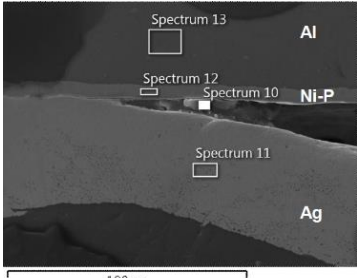
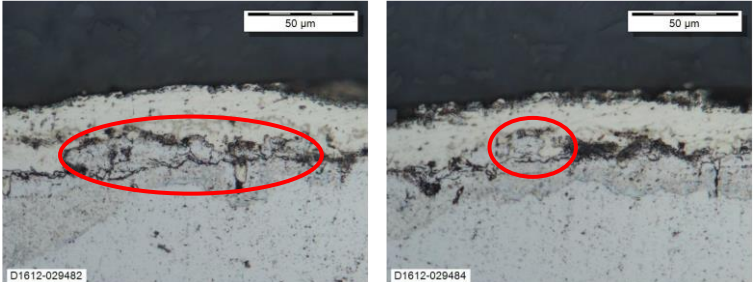

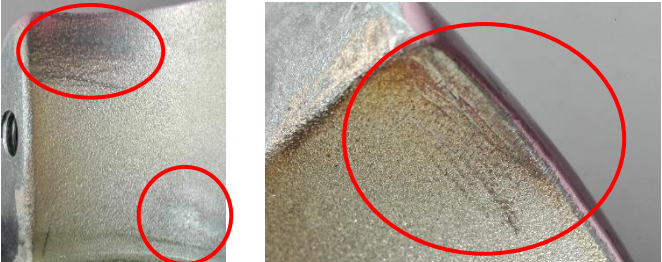
Tab. 8 Rozložení vad na povrchu.

Rozložení vad	Příklad		
Nahodile			
Nahodile souvisle			
Souvisle			

Tab. 9 Druhy vad.

Druhy vad	Příklad	
Bubliny (puchýře)		
Delaminace povlaku od ZM		

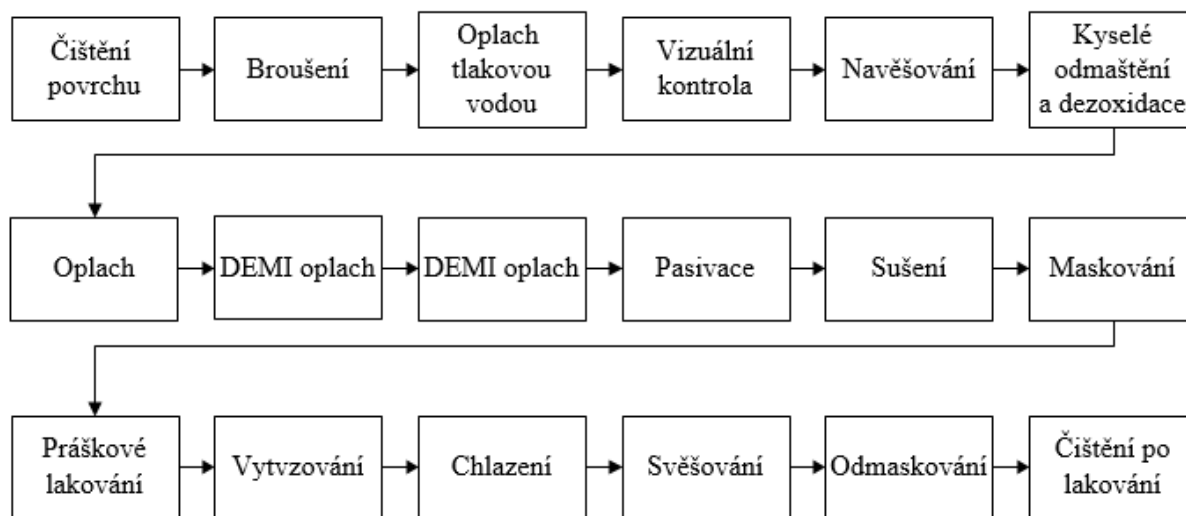
Tab. 9 Druhy vad.

Druhy vad	Příklad
Delaminace povlaku stříbra od mezivrstvy	
Cizí částice (např. třísky) přítomné na povrchu ZM	
Změna barvy / struktury	
Mechanické poškození	

## 4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Závod ABB v městské části Brno-Slatina (dále pouze ABB) disponuje mimo jiné vlastní práškovou lakovnou, kde je lakována vnější plocha vodičů. Proces stříbření jejich vnitřních kontaktních ploch probíhá v kooperaci s externí firmou.

Po dodání vodičů s postříbřenými kontakty do vstupního skladu následuje vstupní (vizuální) kontrola kvality celého vodiče a postříbřené plochy. Po vizuální kontrole následuje předúprava povrchu. Základní procesní kroky předúpravy a práškového lakování jsou popsány v procesní mapě na obrázku 29. Po nanesení PNH následuje vypálení v horkovzdušné plynové peci. Po procesu práškového lakování prochází vodiče mezioperační kontrolou, kde je kontrolována 100% kvalita laku i postříbřené plochy.



Obr. 29 Procesní mapa práškové lakovny

Vady postříbřené plochy vodiče mohou být detekovány při vizuální kontrole před vstupem vodiče do výrobního procesu, mezioperační kontrole, příp. během procesu lakování. Ve většině případů jsou vady zaznamenány po procesu lakování (po průchodu vodičů vypalovací pecí) při mezioperační kontrole. Při vyhodnocení počtu vad povlaku stříbra na vodičích v roce 2017 bylo zjištěno, že počet vadných komponent postříbřených metodou ponorovou byl přibližně třikrát vyšší než počet vadných komponent postříbřených metodou tamponovou. Nejčastěji mají vady podobu puchýřků či bublinek, méně často dochází k souvislé delaminaci vrstvy stříbra (tab. 9).

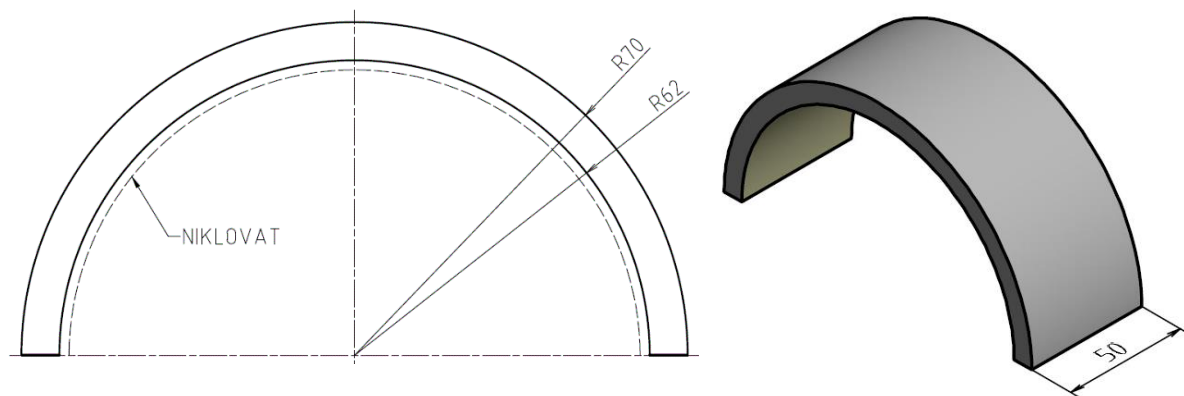
### 4.1 Velikost a materiál vzorků

Materiálem vzorků je stejná slitina hliníku jako u vodičů používaných ve výrobě, a to slitina EN AW-6101B (tab. 10). Pro experiment byly zvoleny dva typy vzorků:

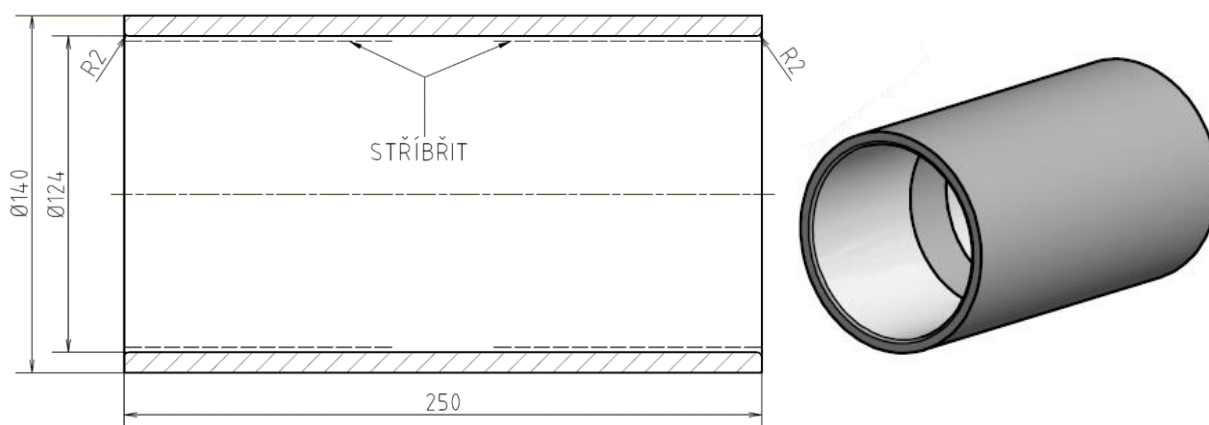
- Vodič A (obr. 30) – určený pro testy, které nevyžadují plný profil vzorku.
- Vodič B (obr. 31) – tvar vzorku je z důvodu simulace reálného procesu analogický k standartnímu tvaru vodičů používaných ve výrobě. Délka byla zvolena tak, aby simulovala reálný proces stříbření.

Tab. 10 Chemické složení slitiny EN AW-6101B [Al Mg Si(B)] [96], [97].

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ostatní prvky		Al
						Jednotlivě	Zbytek	
[%]								
0,3 – 0,6	0,1 – 0,3	0,05	0,05	0,35 – 0,6	0,1	0,03	0,1	Zbytek



Obr. 30 Vzorek Vodič A



Obr. 31 Vzorek Vodič B

## 4.2 Návrh experimentů

Ve snaze o co nejobjektivnější zhodocení problematiky tvoření vad na vodičích byly po konzultaci s hlavním technologem práškové lakovny navrženy tyto testy:

- určení potenciálních vlivů na kvalitu povlaku stříbra v procesu stříbření,
- vyloučení vlivu teploty vypalovací pece na změnu mikrostruktury vodiče,
- testování kvality povlaku stříbra a vlivu na jeho zatížení procesem práškového lakování,
- testování vlivu vzdušného kyslíku na oxidaci hliníkové slitiny.

### 4.2.1 Určení potenciálních vlivů na kvalitu povlaku stříbra v procesu stříbření

Cílem testování ve firmě Lars Chemie v Brně bude určení potenciálních hlavních vlivů na kvalitu povlaku stříbra. Ve snaze o určení optimálních procesních podmínek procesu stříbření tak, aby postříbřený povrch splňoval podmínky interní instrukce, budou pozorovány potenciální vlivy technologie chemické předúpravy a technologie nanášení mezivrstvy a stříbra. Volba procesních parametrů během testování bude provedena na základě možností firmy, na základě konzultace s dodavateli chemických přípravků, zkušeností hlavního technologa firmy Lars Chemie a na základě průběžně dosažených výsledků. Pro test budou použity vzorky Vodiče A a Vodiče B. Podmínky pro vizuální kontrolu a vybrané testy adheze povlaku jsou v tabulce 12. Volba testů pro adhezi povlaku proběhla s ohledem na interní instrukci ABB pro kvalitu povlaku stříbra.

Firma Lars Chemie disponuje mimo jiné automatickou stříbricí linkou. Základní stupně procesu stříbření jsou v tabulce 11. Mezi tyto stupně jsou v pracovním procesu zařazeny ve většině případů dvoustupňové oplachy.

Tab. 11 Proces stříbření.

Stupeň	Název procesu	Měnitelné parametry procesu
1.	Alkalické odmaštění	
2.	Moření	doba expozice v lázni
3.	Vyjasnění	
4.	Zinkátování	doba expozice v lázni
5.	Vyjasnění v kyselině dusičné	doba expozice v lázni
6.	Zinkátování	doba expozice v lázni
7.	Mědění	doba expozice v lázni, proudová hustota
8.	Předstříbření	doba expozice v lázni, proudová hustota
9.	Stříbření	doba expozice v lázni, proudová hustota
10.	Pasivace	

Tab. 12 Podmínky pro vizuální kontrolu a testy adheze povlaku [17].

Zkratka	Název zkoušky	Popis
VK	Vizuální kontrola	Při vizuální kontrole musí povlak stříbra splňovat následující podmínky: čistý povrch, jednotný barevný vzhled, povrch bez delaminace nebo puchýřů (bublin), bez granulovaného vzhledu a bez výčnělků nebo vměstků způsobených růstem povlaku. V případě, že povlak splňuje tyto podmínky, následuje označení výsledku VK jako OK. V opačném případě je výsledek VK označen jako NOK.
TP	Test páskou	Test páskou (s min. adhezní odolností $4 \text{ N}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) je určen pro testování adheze povlaků. Na odmaštěný povrch se přiloží adhezní páska, která se trhnutím pod úhlem $90^\circ$ odstraní. V případě, že povlak neulpí na pásce (nedojde k delaminaci povlaku) je výsledek TP označen jako OK. V opačném případě je výsledek TP označen jako NOK.
TR	Test tepelným rázem	Vzorek se ohřeje na předepsanou teplotu, následuje výdrž na teplotě a ochlazení (DIN EN ISO 2819 a ISO 4521).

#### 4.2.2 Vyloučení vlivu teploty vypalovací pece na změnu mikrostruktury vodiče

Cílem tohoto testu je vyloučení vlivu vypalovací pece, která je součástí lakovací linky, na mikrostrukturu vodiče, a tím i vlivu na kvalitu povlaku stříbra na vodičích. Pro testování budou použity dva vzorky typu Vodič A (obr. 30). Vodič A3 nebude po dodání dodavatelem žádným způsobem tepelně ani mechanicky namáhán a bude použit pro porovnání s Vodičem A1. Vodič A1 bude navěšen na manipulační zařízení linky před chemickou předúpravou a tepelně zatížen v provozu při standardním procesu vypalování v horkovzdušné vypalovací peci ABB.

Výsledkem testu bude teplotní křivka, která bude znázorňovat průběh teploty povrchu vzorku v závislosti na čase. Druhá teplotní křivka bude zaznamenávat teplotu okolí vzorku. Dalším výsledkem bude porovnání mikrostruktury obou vzorků.

#### 4.2.3 Testování kvality povlaku stříbra a vlivu na jeho zatížení procesem práškového lakování

Na kvalitu povlaku stříbra může mít vliv nejen základní materiál, způsob vytvoření mezivrstvy či vrstvy stříbra, ale i proces vypalování práškové barvy. Mezi potenciální vlivy může patřit: teplota nastavení vypalovací pece, doba expozice ve vypalovací peci, tvarová složitost dílce, teplota a druh ochlazovacího prostředí, proudění vzduchu (vody) v peci, příp. v chladicím zařízení, chemická předúprava apod. Proto je cílem tohoto testování provést takové zkoušky, které mimo jiné prověří vliv procesu práškového lakování na kvalitu povlaku stříbra. Dalším cílem je porovnání kvality metod nanášení (elektrostaticky dvěma možnými způsoby – metodou ponorem a tamponově) stříbra na vodič pomocí zvolených testů.

Dle průběžného vyhodnocování počtu vad povlaku stříbra na vodičích se předpokládá, že více problematickou metodou bude metoda ponorem. Proto do tohoto testování bude zařazeno pomocné testování adheze a tloušťky mezivrstvy chemického niklu u metody ponorem. Pro pomocné testování chemického niklu budou použity vzorky typu Vodič A. Pro porovnání kvality povlaku stříbra u obou metod jeho nanášení budou použity vzorky typu Vodič B. U ponorového nanášení povlaku stříbra bude mezivrstva niklu vyloučena chemicky a u tamponového nanášení povlaku stříbra bude mezivrstva niklu vyloučena galvanicky. Vzorky budou dodané firmou, která standardně dodává postříbřené vodiče firmě ABB.

Podmínky pro kontrolu kvality povlaku stříbra po dodání vzorků jsou uvedeny v tabulce 13. Podmínky pro vizuální kontrolu a testování adheze povlaku dle interní instrukce pro kvalitu povlaku stříbra jsou uvedeny v tabulce 14. Ve snaze o co nejobjektivnější zhodocení kvality povlaku stříbra byly po konzultaci s hlavním technologem lakovny zvoleny další testy, jejichž podmínky jsou v tabulce 15.

Tab. 13 Podmínky pro kontrolu kvality povlaku stříbra po dodání vzorků.

Název zkoušky	Popis
Tvrdost povlaku stříbra	Tvrdost povlaku stříbra je předepsaná interní instrukcí. Měření tvrdosti by mělo probíhat v souladu s normou EN ISO 4516.
Tloušťka mezivrstvy	Tloušťka mezivrstvy, příp. mezivrstev je předepsaná interní instrukcí.
Tloušťka vrstvy stříbra	Tloušťka vrstvy stříbra je dle interní instrukce vždy předepsaná na výkresu.

Tab. 14 Podmínky pro vizuální kontrolu a testy adheze povlaku [17].

Zkratka	Název zkoušky	Popis
VK	Vizuální kontrola	Viz. tabulka 12.
TP	Test páskou	Viz. tabulka 12.
TR	Test tepelným rázem	Viz. tabulka 12.
TT	Test třením	Zkouška adheze povlaku pomocí tření v případě podezření na špatnou adhezi stříbrného povlaku. Podezřelá oblast se tře pomocí kruhové tyčinky s leštěnou polokulovou čelní plochou, viz norma DIN EN ISO 2819.

Tab. 15 Další podmínky testování.

Zkratka	Název zkoušky	Popis
	Prvkové složení	Prvkové složení jednotlivých vrstev a podkladu.
CTZ	Cyklické tepelné zatížení	Několikanásobné tepelné namáhání v peci po stanovenou dobu a následné ochlazení na vzduchu.
ET	Simulace extrémní teploty při procesu vypalování PNH	Zahřátím vzorku na teplotu podstatně vyšší, než je běžně nastavená vypalovací pec, bude zkoušena adheze povlaku při podmínkách, které buď mohou nastat při volbě PNH s vyšší vypalovací teplotou, nebo mohou nastat ve zvláštních případech (např. havárie lakovací linky apod.).
ChP	Standartní proces chem. předúpravy	Testování vlivu chemické předúpravy práškové lakovny.
ChPTZ	Standartní proces chemické předúpravy a tepelné zatížení	Testování vlivu celého technologického procesu práškového lakování (chemická předúprava + sušení + vypalování), viz obrázek 20.

#### 4.2.4 Testování vlivu vzdušného kyslíku na oxidaci hliníkové slitiny

Cílem tohoto testu je zjistit vliv vzdušného kyslíku na oxidaci povrchu hliníkové slitiny za různých podmínek tepelného namáhání. Ze vzorku Vodiče B G10 budou odebrány čtyři vzorky s šířkou 10 mm a výškou 10 mm. První vzorek označen v tabulce X číslem 1 bude ponechán v původním stavu. Zbylé tři vzorky označené čísly 2, 3 a 4 budou vloženy do ZIP sáčků a budou na nich provedeny testy za podmínek uvedených v tabulce 16.

Tab. 16 Podmínky testování vlivu vzdušného kyslíku na oxidaci povrchu.

Vzorek	1	2	3	4
Podmínky	---	---	Zatavení vzorku do uzavřené skleněné ampule za nízkého tlaku cca 0,1 Pa	Tepelné zatížení v provozu práškové lakovny při procesu vypalování PNH v horkovzdušné vypalovací peci ABB
Prostředí	Přítomnost vzduchu	Muflová laboratorní pec, přítomnost vzduchu	Muflová laboratorní pec, bez přítomnosti vzduchu	Vypalovací pec práškové lakovny, přítomnost vzduchu
Teplota [°C]	Teplota okolí	200*	200*	208*
Čas [h]	---	5	5	1,5

\*teplota nastavení pece

### 4.3 Průběh a vyhodnocení experimentů

Hlavní část testování proběhla buď v prostorách práškové lakovny v ABB, nebo v prostorách firmy Lars Chemie, která je vybavena stříbricí linkou a vhodnou testovací pecí. Měření tloušťek vrstev, tvrdost vrstvy stříbra a analýzy prvkového složení proběhlo ve spolupráci s Fakultou chemickou v Laboratoři kovů a koroze Centra materiálového výzkumu

VUT v Brně. Zde také bylo nutné provést část testu pro vliv vzdušného kyslíku na oxidaci hliníkové slitiny z důvodu absence muflové pece a vakuové technologie v ABB a Lars Chemii.

#### 4.3.1 Určení potenciálních vlivů na kvalitu povlaku stříbra v procesu stříbření

Testování ve firmě Lars Chemie bylo rozděleno do dvou fází. V první fázi bylo snahou dosáhnout nastavení optimálních podmínek procesu nejprve pro nanesení vrstvy mědi. Ve druhé fázi bylo cílem nastavit optimální procesní podmínky celého procesu – od chemické předúpravy po vyloučení vrstvy stříbra (tab. 11). Příloha 8 obsahuje tabulku 42, která udává výsledky testování první fáze. K druhé fázi testování nedošlo z důvodu časové a finanční náročnosti. Na základě výsledků testování, praktických zkušeností hlavního technologa stříbřicí linky, hlavního technologa práškové lakovny a poznatků z dostupné literatury jsou v tabulkách 17, 18, 19, 20 a 21 uvedeny možné vlivy na kvalitu povlaku stříbra.

Tab. 17 Vliv základního materiálu [74].

Potenciální vliv	Vysvětlení / popis
Předchozí procesy	Těžko odstranitelné látky z povrchu materiálu, např. silikon, lubrikanty (estery), procesní kapaliny, aditiva používaná při tažení apod.
Chemické složení	Vliv chemického složení ZM a nečistot, intermetalické fáze
Způsob výroby ZM	Tváření, odlévání, kování apod.
Povrch	Drsnost, pórovitost, znečištění povrchu (původ, druh, tloušťka, četnost apod.)
Tvarová složitost dílce	Jednoduchý / komplexní tvar
Fyzikální a mechanické faktory	Rozdílné koeficienty tepelné roztažnosti hliníku a kovů na něm uložených, krystalická mřížka apod.
Chemické vlastnosti	Vysoká afinita hliníku ke kyslíku (tvorba ochranné vrstvy $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).
Elektrodový potenciál	Negativní potenciál hliníku.

Tab. 18 Vliv technologie chemické předúpravy.

Potenciální vliv	Vysvětlení / popis
Technologie	Volba vhodné technologie z různých hledisek
Procesní parametry	Dodržení předepsaných parametrů (koncentrace přípravku, čas expozice součásti v lázni, teplota lázně, pohyb v lázni apod.)
Povaha roztoků lázní	Kyselé / alkalické / neutrální
Pravidelná kontrola a údržba	Výměna / regenerace lázně, kontrola zařízení a měřících přístrojů (čištění / kalibrace)
Nečistoty	Přítomnost nečistot (příp. celých komponent) v lázni
Chemická reakce	Riziko vzniku vodíku a nasycení ZM
Plynulost procesu	Doba, po kterou se díl nachází mimo funkční a oplachové vany; poruchy linky apod.
Časová návaznost s následujícím procesem	Prodleva (doba) mezi chemickou předúpravou a další úpravou povrchu



Tab. 19 Vliv technologie vytvoření mezivrstvy – elektrolytické vyloučení [74].

Potenciální vliv	Vysvětlení / popis
Způsob vyloučení	Ponorové / tamponové
Materiál mezivrstvy	Nikl, měď apod.
Povaha roztoků lázní	Kyselá / alkalická
Chemické složení lázní	Koncentrace přípravku, přítomnost inhibitorů saturace vodíkem apod.
Procesní parametry	Koncentrace přípravku, čas expozice součásti v lázni, teplota lázně, pohyb v lázni apod.
Plynulost procesu	Doba, po kterou se díl nachází mimo funkční a oplachové vany; návaznost na další proces, poruchy linky apod.
Pravidelná kontrola a údržba	Výměna / regenerace lázně, kontrola zařízení a měřících přístrojů (čištění / kalibrace)
Způsob zapojení elektrod	Vylučování katodicky / anodicky
Proudová hustota, hloubková účinnost	Riziko nasycení ZM vodíkem
Tloušťka vytvořené vrstvy	Příliš nízká (nedostatečná) / vysoká
Vzdálenost dílce od elektrody	Rozmístění pokovovaných dílů v lázni
Tvarová složitost dílce	Jednoduchý / komplexní tvar; přídavná elektroda
Způsob připevnění dílce na elektrodu	Například na drát, tyč apod.
Chemické vlastnosti	Chemická čistota (přítomnost nežádoucích prvků) apod.
Mechanické vlastnosti	Tvrdost, adheze apod.

Tab. 20 Vliv technologie vytvoření mezivrstvy – chemické vyloučení.

Potenciální vliv	Vysvětlení / popis
Způsob vyloučení	Výměnou iontů, redukční a kontaktní pokovení
Materiál mezivrstvy	Zinek, nikl, měď apod.
Povaha roztoků lázní	Kyselá / alkalická
Chemické složení lázní	Koncentrace přípravku apod.
Plynulost procesu	Doba, po kterou se díl nachází mimo funkční a oplachové vany; návaznost na další proces, poruchy linky apod.
Procesní parametry	Koncentrace přípravku, čas expozice součásti v lázni, teplota lázně, pohyb v lázni apod.
Pravidelná kontrola a údržba	Výměna / regener. lázně, kontr. zařízení a měřících přístrojů
Chemické vlastnosti	Chemická čistota (přítomnost nežádoucích prvků) apod.
Chemická reakce	Riziko vzniku vodíku a nasycení ZM
Mechanické vlastnosti	Tvrdost, adheze apod.
Tloušťka vytvořené vrstvy	Příliš nízká (nedostatečná) / vysoká

Tab. 21 Vliv technologie nanášení stříbra – elektrolytické vyloučení vrstvy [74].

Potenciální vliv	Vysvětlení / popis
Materiál mezivrstvy	Nikl, měď apod.
Způsob vyloučení	Ponorové / tamponové
Povaha roztoků lázní	Kyselá / alkalická
Chemické složení lázní	Koncentrace přípravku, přítomnost inhibitorů saturace vodíkem apod.
Plynulost procesu	Doba, po kterou se díl nachází mimo funkční vany; poruchy linky apod.
Procesní parametry	Koncentrace přípravku, čas expozice součásti v lázni, teplota lázně, pohyb v lázni apod.
Pravidelná kontrola a údržba	Výměna / regenerace lázně, kontrola zařízení a měřících přístrojů (čištění / kalibrace)
Způsob zapojení elektrod	Vylučování katodicky / anodicky
Proudová hustota, hloubková účinnost	Riziko nasycení mezivrstvy a ZM vodíkem
Tloušťka vytvořené vrstvy	Příliš nízká / vysoká
Vzdálenost dílce od elektrody	Rozmístění pokovovaných dílů v lázni
Tvarová složitost dílce	Jednoduchý / komplexní tvar; přídavná anoda
Způsob připevnění dílce na elektrodu	Například na drát, tyč apod.
Chemické vlastnosti	Chemická čistota (přítomnost nežádoucích prvků) apod.
Mechanické vlastnosti	Tvrdost, adheze apod.

#### 4.3.2 Vyloučení vlivu teploty vypalovací pece na změnu mikrostruktury vodiče

Vodič A1 byl navěšen pomocí háku na manipulační zařízení na začátku procesu práškového lakování před chemickou předúpravou. Po projetí vzorku chemickou předúpravou a usušení v sušící peci byla na Vodič A1 připevněna teplotní sonda (obr. 32) pomocí standartní maskovací pásky. Vzorek byl poté pomocí manipulačního zařízení přesunut do vypalovací pece, kde bylo provedeno měření teploty na povrchu vzorku za standartních podmínek během normálního provozu práškové lakovny.

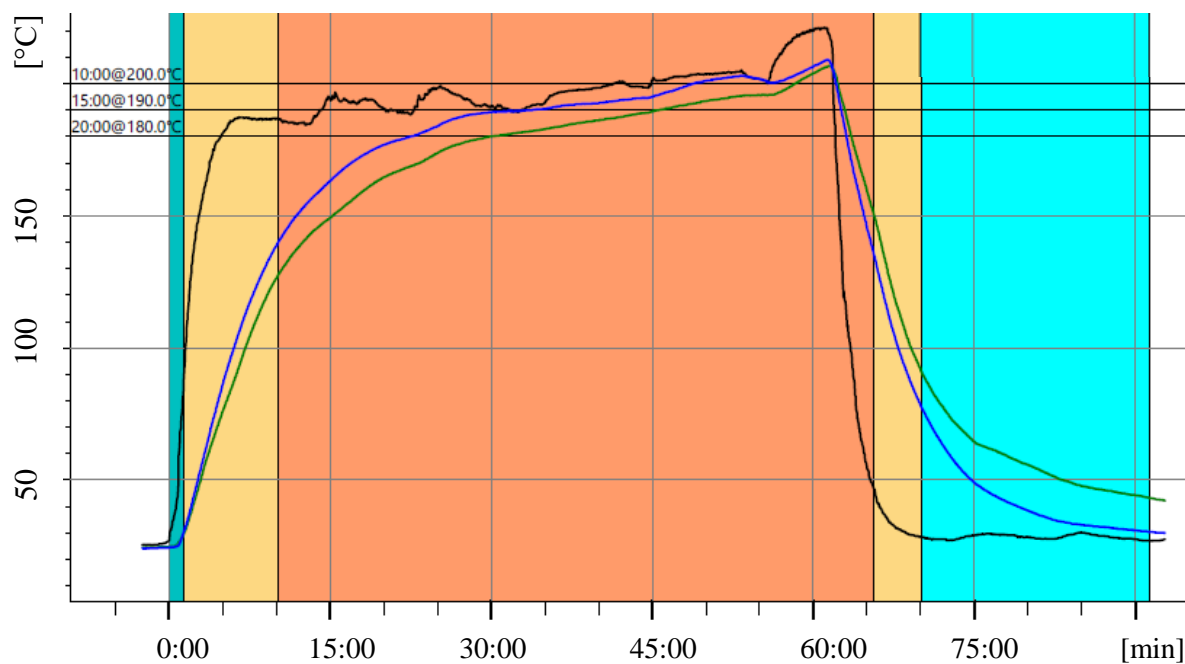
Křivka tepelného zatížení vzorku a teplotní křivka sondy pro snímání teploty okolí vzorku ve vypalovací peci je na obrázku 34. Maximální dosažené teploty při průchodu vzorku pecí byly vyhodnoceny pomocí měřícího zařízení TQC CURVE-X 2 (obr. 33), viz tabulka 22. Analýza mikrostruktury



Obr. 32 Vodič A1

Obr. 33 TQC CURVE-X 2

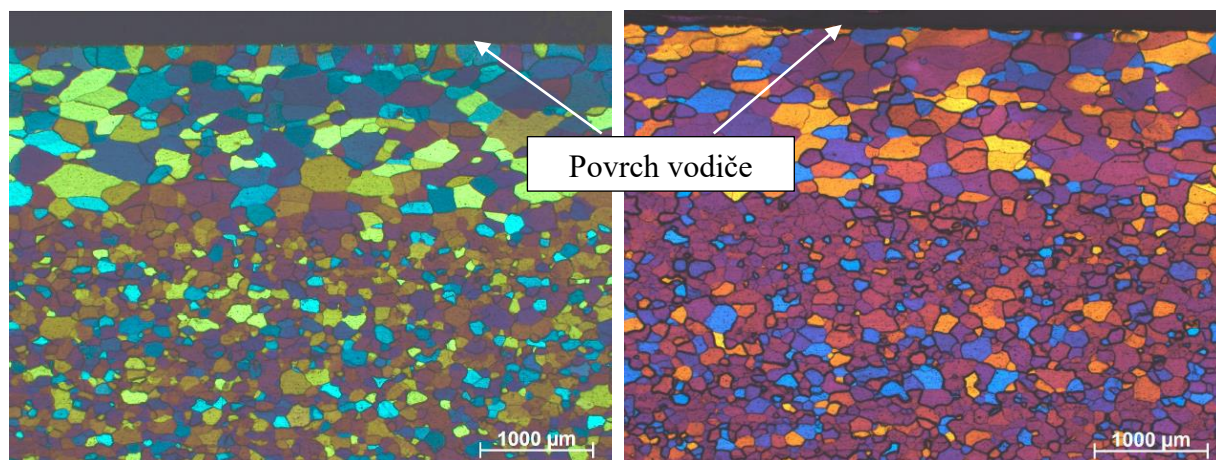
Vodiče A1 (obr. 35) a Vodiče A3 (obr. 36) byla provedena pomocí světelného mikroskopu ZEISS AXIO OBSERVER.



Obr. 34 Teplotní křivka

Tab. 22 Maximální dosažené hodnoty teplot.

	Sonda	Poznámka	Maximální teplota [°C]
—	1	Prostředí (vzduch)	221,5
—	2	Vodič A1	209,2
—	-	Jiný dílec (nezařazen do dipl. práce)	-



Obr. 35 Mikrostruktura vzorku Vodič A1

Obr. 36 Mikrostruktura vzorku Vodič A3 (původní stav)

### 4.3.3 Testování kvality povlaku stříbra a vlivu na jeho zatížení procesem práškového lakování

Pro testování kvality povlaku stříbra a vlivu na jeho zatížení procesem práškového lakování byly použity vzorky typu Vodič A a Vodič B. Vzorky jsou rozděleny podle metody nanášení povlaku stříbra v tabulce 23.

Tab. 23 Rozdělení vzorků.

	Metoda nanášení povlaku stříbra		
	Ponorem		Tamponem
Druh vrstvy	Chemicky vyloučený nikl	Chem. vyloučený nikl + elektrolyticky vyloučené stříbro	Elektrolyticky vyloučený nikl + elektrolyticky vyloučené stříbro
	Vodič A 22	Vodič B G1	Vodič B T1
	Vodič A 23	Vodič B G2	Vodič B T2
		Vodič B G3	Vodič B T3
		Vodič B G4	Vodič B T4
		Vodič B G5	Vodič B T5
		Vodič B G7	Vodič B T6
		Vodič B G8	Vodič B T7
		Vodič B G9	Vodič B T8

Dle podmínek uvedených v tabulce 13, tabulce 14 a tabulce 15 byly provedeny následující testy:

- Vizuální kontrola (VK) a test páskou (TP) – po dodání vzorků dodavatelem byla na všech vzorcích provedena vizuální kontrola a zkouška adheze povlaků pomocí testu páskou. Výsledky VK a TP jsou v tabulce 24.

Tab. 24 Vizuální kontrola a test páskou po dodání vzorů dodavatelem.

Označení	VK	TP	Označení	VK	TP
Vodič A 22	OK	OK	Vodič B G9	OK	OK
Vodič A 23	OK	OK	Vodič B T1	OK	OK
Vodič B G1	OK	OK	Vodič B T2	OK	OK
Vodič B G2	OK	OK	Vodič B T3	OK	OK
Vodič B G3	OK	OK	Vodič B T4	OK	OK
Vodič B G4	OK	OK	Vodič B T5	OK	OK
Vodič B G5	OK	OK	Vodič B T6	OK	OK
Vodič B G7	OK	OK	Vodič B T7	OK	OK
Vodič B G8	OK	OK	Vodič B T8	OK	OK

- Měření tloušťky mezivrstvy (niklu) a povlaku stříbra – provedeno pomocí světelného mikroskopu ZEISS AXIO OBSERVER. Příloha 9 obsahuje obrázky vzorků použitých pro měření. Výsledky měření tloušťky jednotlivých vrstev jsou v tabulce 25.

Tab. 25 Tloušťka povlaků.

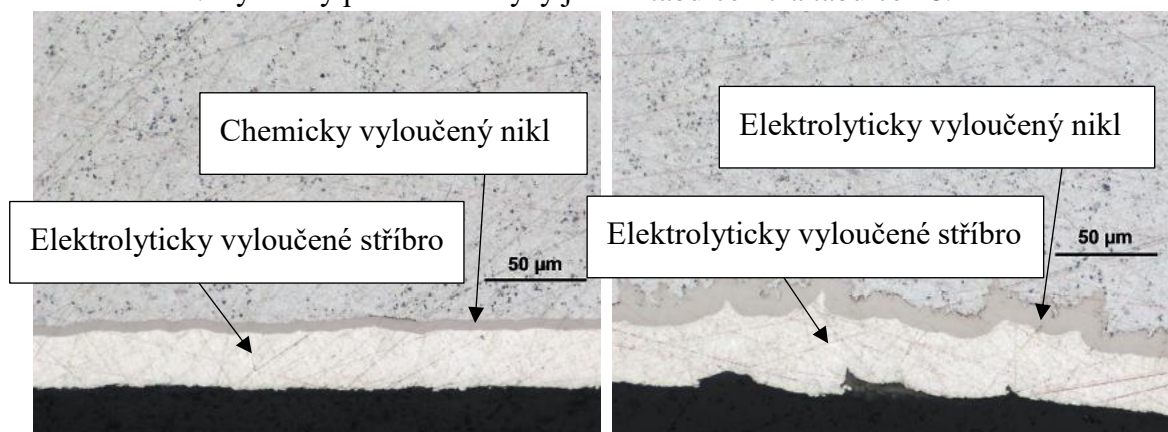
Vzorek		Vodič A 22	Vodič B G1		Vodič B T1	
Vrstva		Nikl	Nikl	Stříbro	Nikl	Stříbro
Tloušťka	[ $\mu\text{m}$ ]	8,6	5,3	28,9	10,9	29,9

- Tvrdost povlaku stříbra – měřena pomocí mikrotvrdoměru LECO AMH 43 metodu dle Vickerse. Tvrdost byla měřena při zatížení 5 g a době výdrže 30 s. Výsledky měření mikrotvrdosti jsou v tabulce 26.

Tab. 26 Mikrotvrdost.

Vzorek		Vodič B G1	Vodič B T1
Tvrdost	[HV 0,005]	105	110

- Prvkové složení jednotlivých vrstev a podkladu – stanoveno za podmínek EDS pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu ZEISS EVO LS 10. Obsah majoritních a minoritních prvků byl vyhodnocen s přesností na 0,5 hm. %. Na obrázku 37 a obrázku 38 je struktura vrstvy niklu a stříbra na povrchu vzorku Vodič B G1 a vzorku Vodič B T1. Výsledky prvkové analýzy jsou v tabulce 27 a tabulce 28.



Obr. 37 Vodič B G1 – metoda stříbření ponorem

Obr. 38 Vodič B T1 – metoda stříbření tamponem

Tab. 27 Prvkové složení jednotlivých vrstev a podkladu Vodiče B G1.

Vzorek	Vrstva	Prvek	[hm. %]
Vodič B G1	Hliníková slitina	Al	85,80
		C	10,36
		O	2,05
		Si	1,34
		Mg	0,45
	Mezivrstva	Ni	83,32
		C	9,00
		P	7,67
	Vrstva stříbra	Ag	97,62
		C	2,38

Tab. 28 Prvkové složení jednotlivých vrstev a podkladu Vodiče B T1.

Vzorek	Vrstva	Prvek	[hm. %]
Vodič B T1	Hliníková slitina	Al	87,47
		C	9,74
		O	1,48
		Si	0,82
		Mg	0,49
	Mezivrstva	Ni	91,45
		C	8,55
	Vrstva stříbra	Ag	96,08
		C	2,55
		O	1,21
		Al	0,16

- Test tepelným rázem (TR) - proveden v laboratoři společnosti Lars Chemie, která disponuje pecí Universal Oven UF30 (dále jen pec Universal Oven) firmy Memmert s maximální teplotou ohřevu 300 °C. Vedle pece byla umístěná nádoba s vodou o teplotě okolí (18–20 °C). Interní instrukce nepředepisuje dobu ohřevu vzorků, proto byly pro test tepelným rázem zvoleny časy 5, 60 a 120 minut. Po ohřátí v peci byly vzorky vloženy do nádoby s vodou. Na obrázku 39, obrázku 40 a obrázku 41 jsou vady v podobě bublin, které vznikly po testu TR. Na obrázku 42 jsou rozměry vybraných bublin na vzorku Vodič G8. Výsledky vizuální kontroly (VK) a výsledky testu páskou (TP) po provedení testu tepelným rázem jsou v tabulce 29.

Tab. 29 Test tepelným rázem.

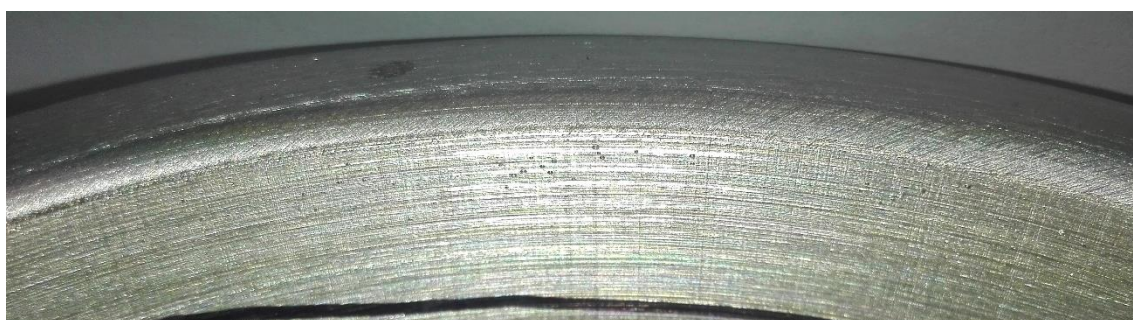
Označení	TR				VK	TP
	Prostředí	Tepł.* [°C]	Čas [min]	Ochlaz. prostředí		
Vodič A 23	pec Universal Oven	220	60	Voda	OK	OK
Vodič B G5	pec Universal Oven	220	5	Voda	NOK	OK
Vodič B G2			60		NOK	OK
Vodič B G8			120		NOK	OK
Vodič B T8	pec Universal Oven	220	5	Voda	OK	OK
Vodič B T3			60		OK	OK
Vodič B T6			120		OK	OK

\*teplota nastavení pece

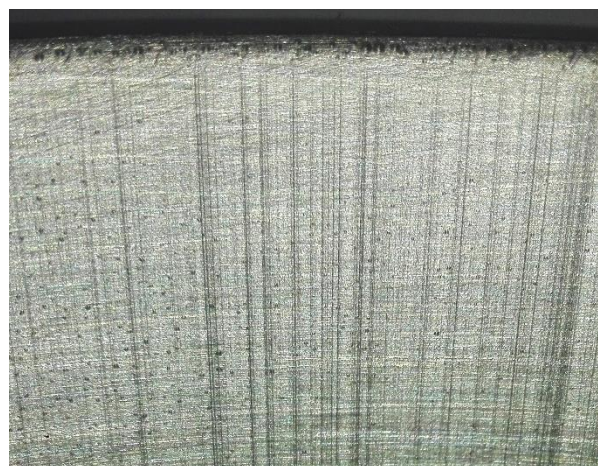




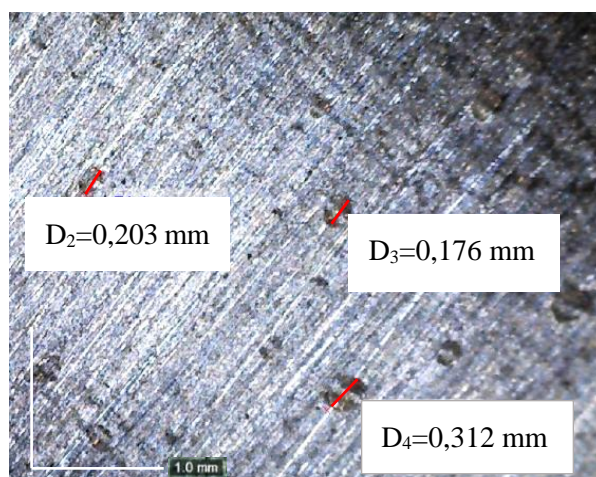
Obr. 39 Vzorek Vodič B G5



Obr. 40 Vzorek Vodič B G2



Obr. 41 Vzorek Vodič B G8



Obr. 42 Rozměry vad vzorku Vodič B G8



- Cyklické tepelné zatížení (CTZ) - po ohřátí v peci po stanovenou dobu byly vzorky z pece vyjmuty a ponechány na vzduchu až do dosažení teploty okolí. Ohřátí a zchladnutí vzorků bylo provedeno třikrát. Výsledky vizuální kontroly (VK) a výsledky testu páskou (TP) po provedení testu tepelným rázem jsou v tabulce 30. Na obrázku 43 jsou vady, které vznikly po třetím tepelném zatížení na vzorku Vodič B G9. Na obrázku 44 jsou rozměry vybraných vad (bublin).

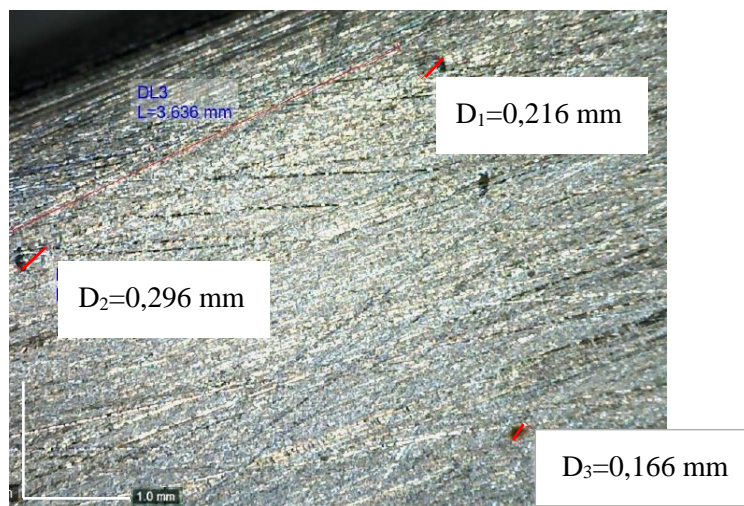
Tab. 30 Cyklické tepelné zatížení.

Označení	CTZ					VK	TP
	Prostředí	Tepl.* [°C]	Čas [min]	Ochlaz. prostředí			
Vodič B G9	pec Universal Oven	220	60	Vzduch	1.	OK	OK
					2.	NOK	OK
					3.	NOK	OK
Vodič B T5	pec Universal Oven	220	60	Vzduch	1.	OK	OK
					2.	OK	OK
					3.	OK	OK

\*teplota nastavení pece



Obr. 43 Vzorek Vodič B G9



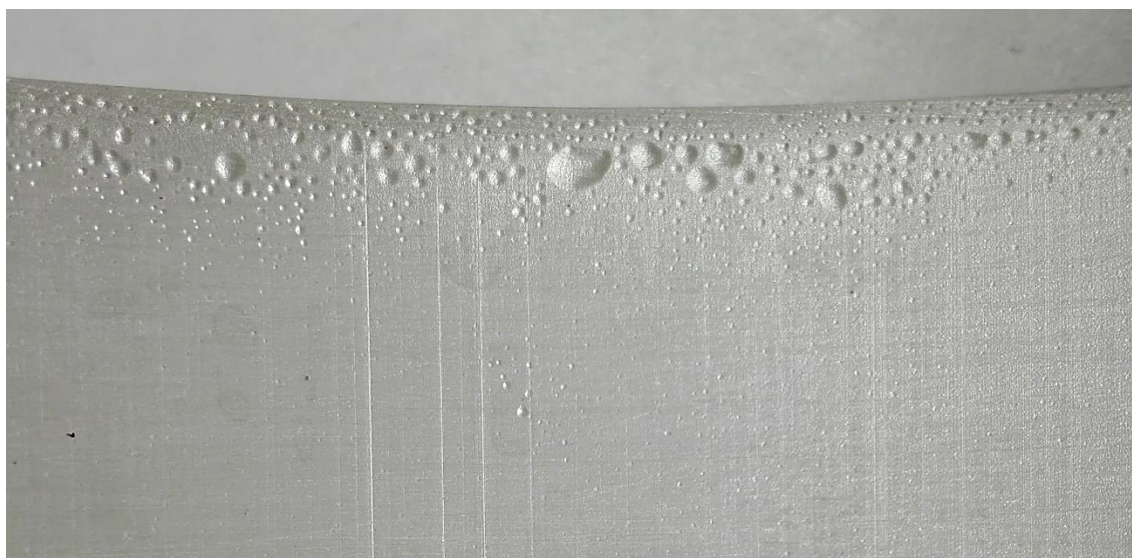
Obr. 44 Rozměry vad vzorku Vodič B G9

- Simulace extrémní teploty při procesu vypalování PNH (ET) - pro simulaci extrémních podmínek při vypalování práškové barvy uskutečněn test, při kterém byly vzorky ohřáty v peci na 290 °C, po 60 minutách vyjmuty a ponechány na vzduchu až do úplného vychladnutí. Výsledky VK a výsledky TP jsou v tabulce 31. Na obrázku 45 a obrázku 46 jsou vady, které vznikly po simulaci extrémní teploty při procesu vypalování PNH na vzorku Vodič B G7. Na obrázku 47 jsou rozměry vybraných vad (bublin).

Tab. 31 Simulace extrémní teploty při procesu vypalování PNH.

Označení	ET				VK	TP
	Prostředí	Tepl.* [°C]	Čas [min]	Ochlaz. prostředí		
Vodič B G7	pec Universal Oven	290	60	Vzduch	NOK	OK
Vodič B T4	pec Universal Oven	290	60	Vzduch	OK	OK

\*teplota nastavení pece

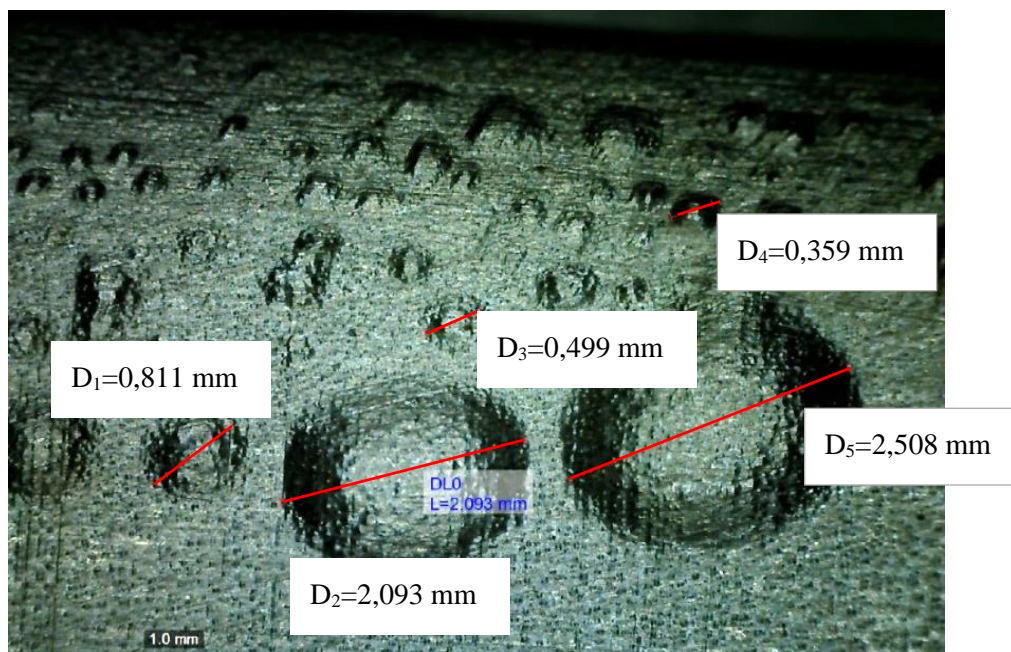


Obr. 45 Vzorek Vodič B G7





Obr. 46 Vzorek Vodič B G7



Obr. 47 Rozměry vad vzorku Vodič B G7

- Test vlivu chemické předúpravy (ChP) - proveden při běžném provozu a standartním procesu chemické předúpravy (obr. 20). Výsledky VK a TP jsou v tabulce 32.

Tab. 32 Test vlivu chemické předúpravy.

Označení	ChP				VK	TP
	Prostředí	Tepl.* [°C]	Čas [min]	Ochlaz. prostředí		
Vodič B G3	Chemická předúprava a sušící pec práškové lakovny ABB	80	11	Vzduch	OK	OK
Vodič B T2	Chemická předúprava a sušící pec práškové lakovny ABB	80	11	Vzduch	OK	OK

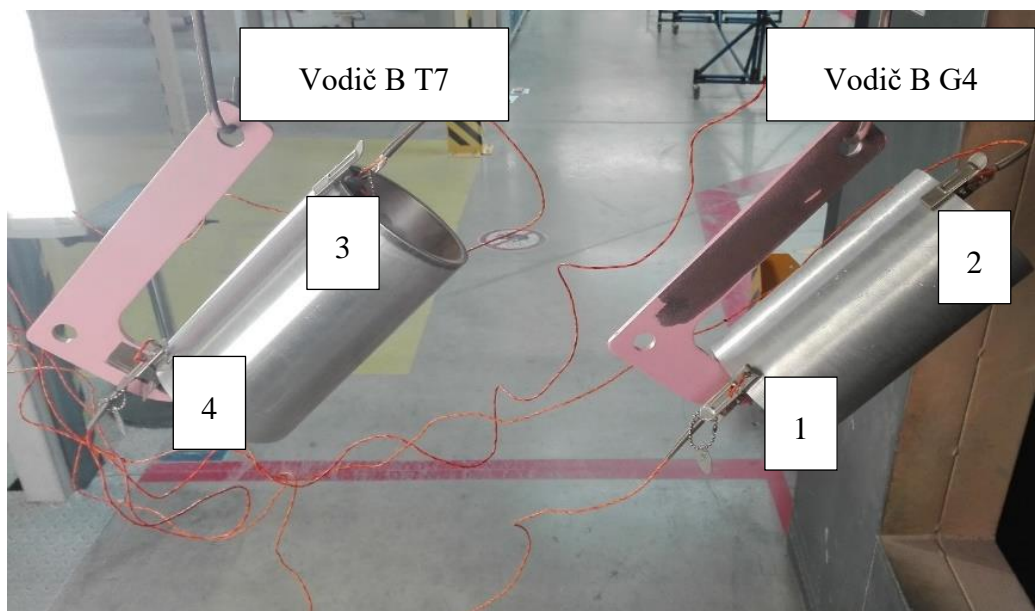
\*teplota nastavení sušící pece

- Test vlivu standartního procesu práškového lakování (ChPTZ) – proveden při běžném provozu a standartním procesem chemické předúpravy a vypalování PNH. Navěšení vzorků na manipulační zařízení a rozmístění teplotních sond je na obrázku 48. Teplotní křivka při průchodu vzorků vypalovací pecí je na obrázku 49 a maximální teploty dosažené při průchodu vzorků pecí byly vyhodnoceny pomocí měřicího zařízení TQC CURVE-X 2, viz tabulka 34. Výsledky VK a TP po provedení testu jsou v tabulce 33. Vady v podobě bublin, které byly zjištěny při vizuální kontrole jsou na obrázku 50.

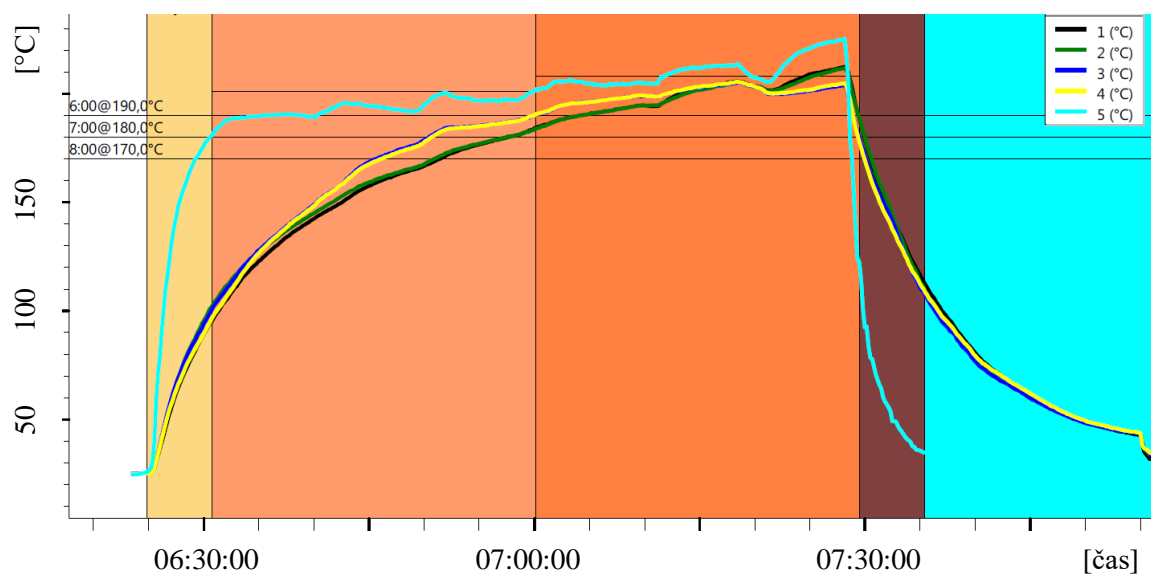
Tab. 33 Test vlivu standartního procesu práškového lakování.

Označení	ChPTZ				VK	TP
	Prostředí	Tepl.* [°C]	Čas [min]	Ochlaz. prostředí		
Vodič B G4	Chemická předúprava, sušící a vypalovací pec práškové lakovny ABB	208	60	Vzduch	NOK	OK
Vodič B T7	Chemická předúprava, sušící a vypalovací pec práškové lakovny ABB	208	60	Vzduch	OK	OK

\*teplota nastavení pece








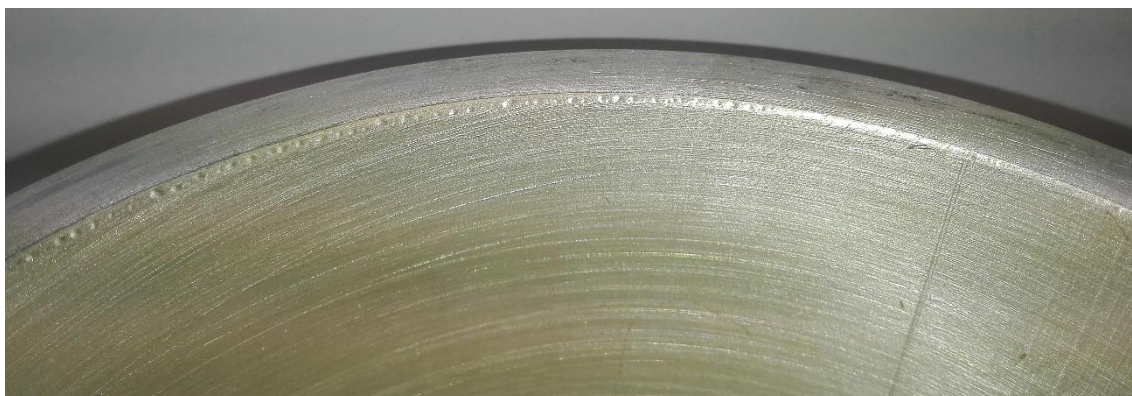
Obr. 48 Navěšení vzorků a měření teplotní křivky



Obr. 49 Teplotní křivka

Tab. 34 Maximální dosažené hodnoty teplot.

	Sonda	Poznámka	Maximální teplota [°C]
	1	Vodič B G4	211,8
	2	Vodič B G4	212,4
	3	Vodič B T7	205,3
	4	Vodič B T7	205,5
	5	Prostředí (vzduch)	225,3



Obr. 50 Vzorek Vodič B G4



- Test třením (TT) - v případě podezření na špatnou adhezi stříbrného povlaku je možné prověřit adhezi vrstvy k podkladu pomocí testu tření kovovou tyčinkou. Podezření na špatnou adhezi stříbrného povlaku k podkladu bylo u vzorků: Vodič B G2, Vodič B G4, Vodič B G5, Vodič B G7, Vodič B G8 a Vodič B G9, kde byly pozorovány vady v podobě bublinek. Vodiče byly pomocí pásové pily podélně rozděleny pro snadnější přístup k vadám a byl na nich proveden TT (obr. 51). Výsledky testu třením jsou v tabulce 35, kde se výsledek testu označuje jako OK v případě, že se povlak v průběhu testu nedelaminoval (příp. se jinak nepoškodil) a jako NOK v případě delaminace povlaku. Delaminace, která vznikla v průběhu TT, je na obrázku 52.



Obr. 51 Test třením



Obr. 52 TT u vzorku Vodič B G7

Tab. 35 Test třením.

Označení	TT
Vodič B G2	OK
Vodič B G4	OK
Vodič B G5	OK
Vodič B G7	NOK
Vodič B G8	OK
Vodič B G9	OK

#### 4.3.4 Testování vlivu vzdušného kyslíku na oxidaci hliníkové slitiny

Ze vzorku Vodič B G10, který neprošel žádným tepelným zatížením ani chemickou předúpravou, byly odebrány celkem čtyři kusy malých vzorků, u kterých byl vnější povrch (tzn. bez povlaku) postupně broušen brusnými SiC papíry až na konečnou zrnitost SiC papíru 1200 se závěrečným oplachem isopropanolem.

První vzorek s číselným označením 1 byl umístěn přímo do komory rastrovacího elektronového mikroskopu. Vzorek s číselným označením 2 byl vložen do muflové pece při teplotě nastavení pece na 200 °C a ponechán zde za přítomnosti vzduchu po dobu 5 hodin. Vzorek s číselným označením 3 byl zataven do uzavřené skleněné ampule za nízkého tlaku cca 0,1 Pa. Poté byl vložen do muflové pece při teplotě nastavení pece na 200 °C a ponechán zde po dobu 5 hodin. Vzorek s číselným označením 4 byl tepelně zatížen v provozu při vypalování PNH v horkovzdušné vypalovací peci ABB po dobu 1,5 hodiny.

Prvkové analýzy povrchu hliníkové slitiny byly provedeny pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu ZEISS EVO LS 10. Naměřená data byla vyhodnocena pomocí softwaru Oxford AZtec. Obsah majoritních a minoritních prvků byl vyhodnocen s přesností na 0,5 hm. %. Zastoupení prvků na povrchu hliníkové slitiny je v tabulce 36 a tabulce 37. Poměr kyslíku a hliníku na povrchu vzorků je v tabulce 38 a tabulce 39.

Tab. 36 Zastoupení prvků na povrchu hliníkové slitiny – vzorky 1 a 2.

Vzorek		1			2		
Urychlovací napětí		5	10	15	5	10	15
		[kV]					
C	[hm. %]	2,3	3,0	4,5	1,9	2,6	3,8
O		3,0	1,9	1,6	4,0	2,3	1,9
Mg		0,5	0,4	0,4	0,6	0,4	0,5
Al		93,7	94,2	93,1	92,0	93,8	93,1
Si		0,5	0,5	0,4	1,5	0,90	0,7
Σ		100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab. 37 Zastoupení prvků na povrchu hliníkové slitiny – vzorky 3 a 4.

Vzorek		3			4		
Urychlovací napětí		5	10	15	5	10	15
		[kV]					
C	[hm. %]	1,6	2,4	3,6	1,8	2,7	4,5
O		2,9	1,9	1,4	2,7	1,6	1,5
Mg		0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4
Al		93,6	94,4	93,8	94,0	94,6	93,1
Si		1,3	0,8	0,7	1,0	0,6	0,5
Σ		100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0



Tab. 38 Poměr kyslíku a hliníku na povrchu hliníkové slitiny – vzorky 1 a 2.

Vzorek		1			2		
Urychlovací napětí		5	10	15	5	10	15
		[kV]					
O	[hm. %]	3,1	1,9	1,6	4,1	2,3	1,9
Al		96,9	98,1	9,84	95,9	97,7	98,1
Σ		100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab. 39 Poměr kyslíku a hliníku na povrchu hliníkové slitiny – vzorky 3 a 4.

Vzorek		3			4		
Urychlovací napětí		5	10	15	5	10	15
		[kV]					
O	[hm. %]	3,0	2,0	1,4	2,8	1,7	1,6
Al		97,0	98,0	98,6	97,2	98,3	98,4
Σ		100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

#### 4.4 Shrnutí výsledků experimentu

Na základě pozorování mikrostruktury (kap. 4.3.2) u vzorků A1 na obrázku 35 a A3 na obrázku 36 lze vyloučit vliv teploty vypalovací pece PNH na jejich mikrostrukturu. Značná heterogenita v pozorované mikrostruktuře u obou vzorků (u povrchu hrubozrnná a v objemu jemnozrnná) je pravděpodobně způsobena jejich výrobou, příp. tepelným zpracováním.

Vzorky určené pro testování kvality povlaku stříbra a vlivu na jeho zatížení procesem práškového lakování (kap. 4.3.3) byly nejprve podrobeny vizuální kontrole a kontrolnímu adhezivnímu testu páskou. Žádný dodaný vzorek nevykazoval vizuální vadu a adheze povlaku u všech dodaných vzorků byla dostatečně velká k tomu, aby se povlak stříbra, příp. mezivrstvy niklu po odtržení adhezivní pásky nedelaminoval. Tloušťka vrstev byla měřena na třech vzorcích náhodně vybraných ze skupin vzorků typu Vodič A, Vodič B G a Vodič B T (Vodič A22, Vodič B G1 a Vodič B T1), viz příloha 9. Tvrdost byla měřena při zatížení 5 g, protože povlak stříbra dosahoval velmi nízkých hodnot tvrdosti a vtisk po měření při zatížení 25 g zasahoval mimo tento povlak.

Pomocí prvkové analýzy provedené pomocí principu EDS bylo ověřeno, že vzorek Vodič B G1 se skládá z hliníkové slitiny, mezivrstvy niklu a vrstvy stříbra (tab. 27). Přítomnost fosforu v chemickém složení mezivrstvy niklu potvrdila, že se jedná o vrstvu vytvořenou chemicky. Druhý vzorek Vodič T1 se skládá z hliníkové slitiny, mezivrstvy niklu a vrstvy stříbra (tab. 28). Prvkovou analýzou bylo potvrzeno, že se jedná o vrstvu niklu vytvořenou elektrolyticky (galvanicky). Měření prvkového složení neprokázalo u těchto vzorků přítomnost nežádoucích nečistot.

Vzorky Vodič B T2, Vodič B T3, Vodič B T4, Vodič B T5, Vodič B T6, Vodič B T7 a Vodič B T8 stříbrené (lokální) tamponovou metodou po testování tepelným ovlivněním (TR, CTZ, ET, ChP, ChPTZ) nevykazovaly vizuální vady. Adheze povlaku po provedení testů byla dostatečně velká k tomu, aby se povlak stříbra, příp. mezivrstvy po odtržení adhezivní pásky nedelaminoval.

Vzorek Vodič A23 po provedení TR nevykazoval vizuální vadu a po provedení TP nedošlo k ulpění povlaku niklu na adhezni pásce. Vzorky Vodič B G2, Vodič B G4, Vodič B G5, Vodič B G7, Vodič B G8 a Vodič B G9 stříbřené ponorovou metodou po provedení testů tepelným ovlivněním (TR, CTZ, ET, ChPTZ) vykazovaly na postříbřené ploše při VK vady v podobě bublin (puchýřů). Povlak v místě bublin byl podroben testu páskou. Po odtržení pásky nedošlo u žádného ze vzorků k jeho poškození (delaminaci) nebo ulpění na pásce. Vzorek Vodič B G3, který byl podroben pouze ChP, tzn. že nebyl podroben tepelnému zatížení ve vypalovací peci, vizuální kontrolu a test páskou splnil.

Test třením byl proveden u vzorků s viditelnými vadami, které vznikly po TR, CTZ, ET, ChPTZ. V průběhu TT pomocí kovové tyčinky vznikla delaminace povlaku pouze u Vodiče B G7 (ET), viz tabulka 35. Tento vzorek vykazoval po testu ET při VK vady největší, viz obrázek 45, obrázek 46 a obrázek 47.

Na základě výsledků testování popsaného v kapitole 4.3.3 je tedy možné předpokládat, že po zahřátí vodiče s kontakty postříbřenými metodou ponorovou na teplotu nastavení pece stejnou nebo větší než 208 °C po dobu stejnou nebo větší než 5 minut se mohou na postříbřené ploše objevit vady v podobě bublin. Tento předpoklad by bylo vhodné ověřit podrobnějším testováním.

Pozorování struktury uložení mezivrstvy na povrch hliníkové slitiny je možné u vzorků Vodič G1 (obr. 37) a Vodič T1 (obr. 38). Zde je možné pozorovat značnou rozdílnost ve struktuře uložení mezivrstvy niklu. U tamponové metody je styčná (kotevní) plocha větší než u metody ponorové. Je možné pozorovat i rozdíl v tloušťkách mezivrstev. Rozdílnost v tloušťkách u obou vzorků potvrzuje tabulka 25.

Výsledky testování vlivu vzdušného kyslíku na oxidaci hliníkové slitiny (kap. 4.3.4) prokázaly, že vzdušný kyslík nemá vliv na oxidaci hliníkové slitiny při tepelném namáhání v peci lakovny. Při porovnání obsahu kyslíku při daném urychlovacím napětí a započtení chyby měření je možné konstatovat, že naměřené hodnoty zastoupení kyslíku na povrchu vzorků jsou přibližně stejné pro všechny čtyři testy. Tento test nevylučuje zvýšenou oxidaci hliníkové slitiny pod povlakem z důvodu např. přítomnosti korozního prostředí ulpělého pod povlakem během procesu povlakování a současného tepelného namáhání v peci.

## 5 ZÁVĚRY

Hliník a jeho slitiny, má mnoho vlastností, které omezují tvoření kvalitního kovového povlaku na jeho povrchu. Tyto vlastnosti, jako jsou například vysoká afinita hliníku ke kyslíku (vedoucí k velmi rychlé tvorbě oxidu hlinitého) a chemicky odolné intermetalické fáze na povrchu slitiny, ztěžují vznik kontaktní kovové vrstvy na povrchu základního materiálu. Dalšími negativními faktory mohou být například rozdílnost koeficientů tepelné roztažnosti základního materiálu a deponovaného kovu, jejich krystalická struktura a přítomnost vodíku v hlavním kovu a v nanesené vrstvě (příp. vrstvách).

Na základě testování kvality povlaku stříbra a vlivu na jeho zatížení procesem práškového lakování v kapitole 4.3.3 lze tvrdit, že projev vad na povrchu vzorků v podobě bublin (puchýřů) v místě pokovení stříbrem byl závislý na teplotě, tedy že riziko projevu bublin se zvyšovalo při podrobení vzorků vyšším teplotám, viz tabulka 29, tabulka 30, tabulka 31, tabulka 33 a tabulka 34. Příčinou vzniku bublin mohlo být vystupování vodíku v podobě vodíkových blistrů na povrch materiálu. Nasycení základního materiálu vodíkem mohlo nastat například během předúpravy povrchu před procesem stříbření nebo při samotných galvanických procesech.

Povlak stříbra u vzorků, které po VK vykazovaly vady ve formě bublin, byl vyloučen metodou elektrolytického pokovení ponorem a vady se vyskytovaly nejčastěji v oblasti hran (cca do 3 až 4 cm od konců vzorků). Proudová hustota při elektrolytickém vylučování kovové vrstvy (stříbra) na jednotlivých místech pokovovaného předmětu je vždy rozdílná a závisí na rozložení elektrostatického pole. Obecně platí, že v místě vnějších hran je proudová hustota vyšší. Lze tedy tvrdit, že pravděpodobnost tvoření vodíkových blistrů se zvyšuje se zvyšováním proudové hustoty (hloubkové účinnosti), tedy že kritickými budou oblasti v blízkosti hran vodiče. Při elektrolytickém pokovení je tedy vždy nutné počítat s redukováním vodíkového kationtu na atomární vodík, který lehce difunduje vyloučenou vrstvou a může proniknout až do základního materiálu. Teoretický vliv na vznik bublin může mít i metoda elektrolytického vylučování stříbra na povrchu vzorků, kde zásadním rozdílem mezi metodou ponorem a metodou tamponem je plocha, kde elektrolytický děj probíhá. U metody tamponem probíhá vylučování stříbra na mnohem menší ploše než v případě metody ponorové, při které se do funkční lázně ponoří vždy celý vzorek.

Na základě struktury deponovaných vrstev na povrchu hliníkové slitiny na obrázku 37 a obrázku 38 lze pozorovat rozdíl v uložení mezivrstvy niklu na povrchu základního materiálu. Kontaktní (styčná) plocha mezi ZM a elektrolyticky vyloučeným povlakem niklu je mnohem větší než kontaktní plocha mezi ZM a povlakem niklu vyloučeným chemicky. Zároveň tloušťka elektrolyt. vyloučeného povlaku niklu je větší než u povlaku vyloučeného chemicky. Vzhledem k tomu, že u vzorků pokovených metodou tamponovou nebyly zjištěny vady, je mimo jiné možné předpokládat, že tloušťka mezivrstvy, velikost a tvarová složitost kontaktní plochy, se kterou je případně spojena i odlišná předúprava povrchu, mohou mít vliv na kvalitu výsledného povlaku stříbra. Tento předpoklad by bylo vhodné ověřit podrobnějším testováním a analýzou většího počtu vzorků.

Elektrolytické nanášení stříbra na povrch je komplexní proces, který představuje velké množství rizik, jako je tvar dílce, riziko nasycení vodíkem, dodržení předepsaných procesních (koncentrace chemických přípravků v lázních apod.) a kvalitativních (tloušťka, tvrdost apod.) podmínek atd. Z provedených testů vyplývá, že vrstva stříbra nanesená na trubkovitý materiál vyrobený ze slitiny hliníku má lepší kvalitu při použití tamponové metody.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [1]

1. Citace Pro. *Citace.com* [online]. Brno: Citace.com [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <https://www.citace.com/citace-pro>
2. *Technologie ABB, které změnilý svět*. ABB, 48 s. Dostupné také z: <http://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK106103A7153&LanguageCode=cs&DocumentPartId=&Action=Launch>
3. ZULATI, Alberto. *PASS steps up: ABB hybrid switchgear technology is now available for 420 kV*. ABB, 6 s. Dostupné také z: [https://library.e.abb.com/public/5b26f23db8084e60bf5cc7feadd8d4ea/42-47%203m592\\_EN\\_72dpi.pdf](https://library.e.abb.com/public/5b26f23db8084e60bf5cc7feadd8d4ea/42-47%203m592_EN_72dpi.pdf)
4. ZIMMERMAN, Werner, André OSTERHOLT a Jürgen BACKES. *Comparison of GIS and AIS systems for urban supply networks*. Germany: ABB Calor Emag Schaltanlagen, 1999, (2). Dostupné také z: [https://library.e.abb.com/public/6faca120ac13bcec12578570053d819/ABB%20Review%201999-02\\_19-26\\_en.pdf](https://library.e.abb.com/public/6faca120ac13bcec12578570053d819/ABB%20Review%201999-02_19-26_en.pdf)
5. TAHIRI, Bekim. *Gas Insulated Switchgear (GIS): General Presentation*. Bogota, 2016. Dostupné také z: <http://new.abb.com/docs/librariesprovider78/eventos/power-energy-day-colombia/presentation-gis---cam-august-2016.pdf?sfvrsn=2>
6. BANERJEE, Prith, Georg SCHETT, Fredi STUCKI, Richard OULTON, Harmeet BAWA, Namita ASNANI a Rona Victoria GREGORIO. *ABB Review Special Report: High-voltage products* [online]. Switzerland: ABB Group R&D and Technology, 2013, 52 s. [cit. 2018-04-22]. ISSN 1013-3119. Dostupné z: [https://library.e.abb.com/public/a35ad08543a74b39c1257b35003b77ef/ABB%20SR%20HV%20Products\\_72dpi.pdf](https://library.e.abb.com/public/a35ad08543a74b39c1257b35003b77ef/ABB%20SR%20HV%20Products_72dpi.pdf)
7. *Profil závodu Brno, Česká republika: Dodavatel zapouzdřených vodičů pro plynem izolované rozvodny velmi vysokého napětí VNN (GIS)*. Brno: ABB, 4 s. Dostupné také z: [https://library.e.abb.com/public/4fd631aed5ec26b9c1257d0e00407965/Factory\\_portrait\\_brno\\_2GPH000045AA\\_CZ\\_A4.pdf](https://library.e.abb.com/public/4fd631aed5ec26b9c1257d0e00407965/Factory_portrait_brno_2GPH000045AA_CZ_A4.pdf)
8. Xiang'an Torch GIS substation in Xiamen. In: *ABB* [online]. Switzerland: ABB Asea Brown Boveri, 2018 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <http://new.abb.com/high-voltage/gis/reference-xiang-an-torch-gis-substation-in-xiamen-china>
9. ABB's technology supports ultra-high-voltage power transmission from West to East China. In: *ABB* [online]. Switzerland: ABB Asea Brown Boveri, 2018, 14 December 2017 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <http://www.abb.com/cawp/seitp202/5832F02EC9446AE4C12581F500435C50.aspx>
10. *Příručka pro nové zaměstnance*. Brno: ABB, 2016.
11. HRNČÍŘ, Bohumil. [Fotografie z instalace plynem izolovaných rozvodů ve Spojených arabských emirátech]. 2014.
12. MUDRUŇKOVÁ, Anna. *Elektrotechnické materiály I*. [online]. Brno: Code Creator, 2016 [cit. 2018-04-22]. ISBN 978-80-88058-90-8. Dostupné z: <https://publi.cz/books/353/Cover.html>
13. Conductivity and Resistivity Values for Misc. Materials. *NDT Resource Center* [online]. Iowa: NDT Education Resource Center, c2001-2014, 2002 [cit. 2018]. Dostupné z: [https://www.nde-ed.org/GeneralResources/MaterialProperties/ET/Conductivity\\_Misc.pdf](https://www.nde-ed.org/GeneralResources/MaterialProperties/ET/Conductivity_Misc.pdf)
14. Conductivity and Resistivity Values for Aluminum & Alloys. *NDT Resource Center* [online]. Iowa: NDT Education Resource Center, c2001-2014, 2002

- [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: [https://www.nde-ed.org/GeneralResources/MaterialProperties/ET/Conductivity\\_Al.pdf](https://www.nde-ed.org/GeneralResources/MaterialProperties/ET/Conductivity_Al.pdf)
15. CHOCHOLÁČOVÁ, Kateřina. *Podklad pro dipl. práci – seznam stříbřených dílů* [e-mailová komunikace]. 31. října 2017 15:32 [2018-04-22].
  16. HORVATH, Vladimír. *Zoznam striebrených dielov a ich základný materiál* [e-mailová komunikace]. 10. listopadu 2017 8:52 [2018-04-22].
  17. 9ABA440001. *Silver plating instructions for aluminium, copper and alloys as contact material*. 5. revision. Switzerland: ABB, 2007.
  18. 9ABA440203. *Common Painting Instruction*. 4. revision. Switzerland: ABB, 2010.
  19. MICHNA, Štefan, Ivan LUKÁČ, Vladivoj OČENÁŠEK, Rudolf KOŘENÝ, Heinz SCHNEIDER a Andrea MIŠKUFOVÁ. *Encyklopedie hliníku*. Prešov: Adin, 2005. ISBN 80-890-4188-4.
  20. MIHÁČ, Maroš. [Problematika studených spojů] [zvukový záznam]. 20. 2. 2018. Archiv autora.
  21. KONVALINKA, Roman, 2018. Chemické předúpravy před lakováním: Fosfátování a jeho úspěšné nahrazování konverzními povlaky na bázi oxidů zirkonu. *51. Celostátní aktiv galvanizérů: Sborník přednášek*. Jihlava: Česká společnost pro povrchové úpravy, s. 27-32. ISBN 978-80-905648-4-8.
  22. KRAUS, Václav. *Povrchy a jejich úpravy*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 80-7082-668-1.
  23. KONVALINKA, Roman, 2018. *Chemické předúpravy před lakováním: Fosfátování a jeho úspěšné nahrazování konverzními povlaky na bázi oxidů zirkonu*. Jihlava.
  24. KALEDOVÁ, Andrea. *Technologie nátěrových hmot II.: povrchové úpravy a způsoby předúpravy materiálů*. Pardubice: Univerzita Pardubice, Fakulta chemicko-technologická, Ústav polymerních materiálů, 2003. ISBN 80-7194-555-2.
  25. TULKA, Jaromír, 2005. *Povrchové úpravy materiálů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická. ISBN 80-214-3062-1.
  26. PFERD, *Technické kartáče*. Dostupné také z: <http://www.boukal.cz/wp-content/uploads/2017/07/katalog-208-wzh22-72dpi-cz.pdf>
  27. TYROLIT, 2018. *Katalog výrobků: Pro průmyslové aplikace*. Schwaz. Dostupné také z: <https://www.yumpu.com/en/embed/view/gYokS5pw3yE9Peav/143>
  28. Balotina, *Abraziva.cz: Portál se specializací na tryskáci a brusné materiály* [online]. Kaznějov: Reno - Tech.cz [cit. 2019-01-22]. Dostupné z: <http://www.abraziva.cz/balotina/>
  29. MOHYLA, Miroslav. *Technologie povrchových úprav kovů*. 3. vyd. Ostrava: VŠB – Technická univerzita, 2006. ISBN 80-248-1217-7.
  30. KUNZ, Ulrike, 2013. *Quality assurance in Industrial Parts Cleaning: Basics Chemistry and Processes*. SurTec. Dostupné také z: <https://www.surtec.com/en/knowledge/knowledge-archive/cleaning-technology-overview/>
  31. EMMERICH, Jens, 2014. Criteria for Selecting the Correct Cleaning System: Aqueous Parts Cleaning. *JOT International Surface Technology*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 1(1), 34-36. ISSN 2192-8703
  32. Acidic Degreasers / Cleaners, c2008. Surface treatment technologies [online]. ILVE Chemicals [cit. 2019-01-22]. Dostupné z: <http://www.ilve.com.tr/acidic-degreaser.html>

33. SURTEC, 2015. *SurTec® 472: Acid Cleaner*. Dostupné také z: <https://www.surtec.com/en/products/product-overview/degreasing-etching-and-desmutting-of-light-metals-56/surtec-472-570/>
34. KUNZ, Ulrike, 2014. *Optimization of cleaning processes based on process chain analysis*. SurTec. Dostupné také z: <https://www.surtec.com/en/knowledge/knowledge-archive/cleaning-technology-overview/>
35. *TriboTechnika*, 2018. Žilina: Techpark, o. z., **11**(1). ISSN 1338-0524.
36. ČSN EN ISO 7599, *Anodická oxidace hliníku a jeho slitin – Všeobecné specifikace pro anodické oxidové povlaky na hliníku*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. Třídící znak: 03 8650.
37. ČSN EN 12487, *Ochrana kovů proti korozi - Oplachované a neoplachované chromátové konverzní povlaky na hliníku a slitinách hliníku*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2007. Třídící znak: 03 8633.
38. CHANDLER, Wayne, 2008. Pros and Cons of Alkaline vs. Acid Etching of Aluminum. *Metalfinishing*. **106**(9), 15-18. ISSN 0026-0576.
39. *Aluminum and aluminum alloys* [online], c1993. Materials Park, OH: ASM International [cit. 2019-01-23]. ISBN 978-0-87170-496-2. Dostupné z: [https://books.google.si/books?id=Lskj5k3PSIcC&pg=PA3&hl=cs&source=gbs\\_toc\\_r&cad=4#v=onepage&q&f=false](https://books.google.si/books?id=Lskj5k3PSIcC&pg=PA3&hl=cs&source=gbs_toc_r&cad=4#v=onepage&q&f=false)
40. VOLK, Peter, 2015. *Structure Analysis and Layer Formation Processes of Trivalent Chromium Containing Passivations*. Vídeň. Dostupné také z: <https://www.surtec.com/en/knowledge/technical-presentations-overview/>
41. VOLK, Peter, 2013. *TSB Project Meeting in Lboro: Replacement of Hexavalent Chromium*. Dostupné také z: <https://www.surtec.com/en/knowledge/technical-presentations-overview/>
42. *Specifications For A Quality Label For Liquid And Powder Organic Coatings On Aluminium For Architectural Applications*, 2017. 15th ed. Zurich: Qualicoat.
43. GSB AL 631, *International Quality Regulations For The Coating of Building Components: Aluminium*, 2017. Düsseldorf: GSB International.
44. ALUFINISH, *Alternativní konverzní procesy III: Ekologické, bezchromové systémy ENVIROX*.
45. KOKALJ, Edi. *TCP – Replacement of conventional chemical treatment before painting*. Barcelona, 2011.
46. POKORNÝ, Petr, c2008-2019. Klasifikace fosfatových povlaků. *TriboTechnika* [online]. TechPark [cit. 2019-01-23]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-62012/klasifikace-fosfatovych-povlaku.html>
47. SURTEC, 2011. *SurTec 650 – Tri-Chrome Passivation of Aluminium: Presentation at 5th Aluminium Symposium*. Dostupné také z: <https://www.surtec.com/en/knowledge/technical-presentations-overview/>
48. VOLK, Peter, 2013. *Vorbehandlung von Metalloberflächen vor der Lackierung: Phosphatierungen und energieeffiziente Alternativen*.
49. VOLK, Peter, 2017. *Chemical Metal Pre-treatment: Basic And New Developments*. Dostupné také z: <https://www.surtec.com/en/knowledge/technical-presentations-overview/>
50. BARTOŠÍK, Jan, 2017. *Korozní ochrana hliníku C5-M*. Dostupné také z: <https://www.sqi.cz/index.php/ke-stazeni/>

51. SZELAG, Petr a Jaroslav CHOCHOLOUŠEK, 2008. Železnaté fosfátování. *MM Průmyslové spektrum: Řezné nástroje v třískovém obrábění*. Praha: MM publishing, (4). ISSN 1212-2572.
52. SONDERMANN, Thomas, 2013. Aus Chromat wird chromfrei. *JOT Journal für Oberflächentechnik* [online]. Springer Fachmedien Wiesbaden, 25 April 2013, **53**(5), 51-53 [cit. 2019-01-24]. ISSN 0940-8789. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1365/s35144-013-0719-z>
53. KREISLOVÁ, Kateřina, Jiří MRÁZEK, Libor TUREK a Pavel DUŠEK, 2018. Analýza bezchromových pasivačních povlaků. *51. Celostátní aktiv galvanizérů: Sborník přednášek*. Jihlava: Česká společnost pro povrchové úpravy, s. 63-69. ISBN 978-80-905648-4-8.
54. KONVALINKA, Roman, 2009. INTERLOX – Zirkonové pasivace hliníku s certifikací QUALICOAT. *Povrchová úprava* [online]. Hradec Králové: IMPEA, **5**, 3-4 [cit. 2019-01-24]. ISSN 1801-707X. Dostupné z: <http://docplayer.cz/5561288-Povrchova-uprava-interlox-zirkonove-pasivace-hliniku-s-certifikaci-qualicoat.html>
55. ATOTECH, 2013. *Interlox: Cr(VI)-free and Cr-free Passivates for Aluminum*. Dostupné také z: <https://www.a3ts.org/wp-content/uploads/2013/07/Interlox-A3TS-Marseille.pdf>
56. SURTECH, 2018. *SurTec® 640: No-Rinse Conversion Coating*. Dostupné také z: <https://www.surtec.com/en/products/product-overview/aluminium-pre-treatment-50/surtec-640-270/>
57. SURTECH, 2017. *SurTec® 609: ZetaCoat*. Dostupné také z: <https://www.surtec.com/en/products/product-overview/phosphates-and-phosphate-replacement-49/surtec-609-gv-260/>
58. HLAVÁČEK, Petr. *Alternativní přípravky pro nanesení konverzní vrstvy* [e-mailová komunikace]. 24. dubna 2018 [cit. 2019-01-24].
59. TAJCHMAN, Petr. *Alternativní přípravky pro nanesení konverzní vrstvy* [e-mailová komunikace]. 24. dubna 2018 [cit. 2019-01-24].
60. KONVALINKA, Roman. *Alternativní přípravky pro nanesení konverzní vrstvy* [e-mailová komunikace]. 24. dubna 2018 [cit. 2019-01-24].
61. *Anodická oxidace hliníku a jeho slitin – eloxování*, 2012. Dostupné také z: [http://www.ekochem-ppu.cz/Materie%20A11y/Anodicka\\_oxidace\\_hliniku\\_a\\_jeho\\_slitin.pdf](http://www.ekochem-ppu.cz/Materie%20A11y/Anodicka_oxidace_hliniku_a_jeho_slitin.pdf)
62. ITWGEMA, 2000. *The Electrostatic Powder Coating*.
63. TALBERT, Rodger, 1998. *The Powder Coater's Manual* [online]. Vincentz [cit. 2019-01-24]. ISBN 387870447X. Dostupné z: <https://www.qualiteam.net/DOWNLOADS/Powder%20Coating%20Talbert.pdf>
64. ULRICH, Darryl, c1993. *User's guide to powder coating*. 3rd ed. Dearborn, Mich.: Society of Manufacturing Engineers. ISBN 08-726-3444-2.
65. KREEGER, Ken, c1994. *APPLICATION VARIABLES FOR POWDER COATING SYSTEMS*. Ohio: Nordson Corporation.
66. *Tribo or Corona?: Here's How to Decide*, c2008. Nordson Corporation.
67. *Electrostatic Phenomena In Powder Coating: New Methods Of Improving Faraday-Cage Coating, Finish Quality And Uniformity, And Recoating Operations*, c2017. Ohio: Nordson Corporation.
68. IDEAL-TRADE SERVICE, 2015. *Průvodce práškovým lakováním*. Brno.



69. První infračervená katalytická pec v ČR, c2019. *Dikrt* [online]. Czechproduct [cit. 2019-01-24]. Dostupné z: <http://www.dikrt.cz/53035/infracervena-katalyticka-pec.html>
70. IR pece, c2018. *Surfin Technology* [online]. Brno: SURFIN Technology [cit. 2019-01-24]. Dostupné z: <https://www.surfin.cz/technologie/ir-pece.html>
71. DONABAUER, Petr. *Volba vhodného systému vytvrzování práškových nátěrových hmot*. Brno 2013. 89 s., 5 příloh. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí diplomové práce Ing. Jaroslav Kubíček.
72. HUBLAR, Martin, Vytvrzování PNH. Brno.
73. RUMML, Vladimír, 1981. *Galvanické pokovování*. Praha: SNTL, 321 s.
74. LUKOMSKII, Yu Ya, 1991. Electrolytic deposition of metals on aluminium and its alloys. *Russian Chemical Reviews* [online]. **60**(5), 539-554 [cit. 2019-01-25]. ISSN 0036-021X.
75. *ASM Handbook Volume 5: Surface Engineering*, 1994. 10th edition. Materials Park, Ohio: ASM International. ISBN 978-0-87170-384-2.
76. OBR, Ladislav, 2017. Moderní technologie pokovení hliníku a jeho slitin. *Povrcháři* [online]. (7), 6-10 [cit. 2019-01-25]. ISSN 1802-9833. Dostupné z: [http://www.povrchari.cz/kestazeni/201707\\_povrchari.pdf](http://www.povrchari.cz/kestazeni/201707_povrchari.pdf)
77. OBR, Ladislav, c2008-2019. Nové směry v aplikacích technologie chemického niklování. *TriboTechnika* [online]. Žilina: TechPark [cit. 2019-01-25]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-32015/nove-smery-v-aplikacich-technologie-chemickeho-niklovani.html>
78. VOLK, Petr, 2004. *Zincate Treatment of Aluminium: SurTec Technical Letter 15*. Dostupné také z: [https://www.surtec.com/ecomaXL/files/surtec\\_2086180031352292983TB15E.pdf](https://www.surtec.com/ecomaXL/files/surtec_2086180031352292983TB15E.pdf)
79. SHA, W., X. WU a K. G. KEONG, 2011. 15 - Applications of electroless nickel–phosphorus (Ni–P) plating. *Electroless Copper and Nickel–Phosphorus Plating: Processing, Characterisation and Modelling*. Cambridge: Woodhead Publishing, s. 263-274. ISBN 978-1-84569-808-9.
80. OBR, Ladislav, c2008-2019. Vstup do technologie povrchových úprav. *TriboTechnika* [online]. Žilina: TechPark [cit. 2019-01-25]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-62015/vstup-do-technologie-povrchovych-uprav.html>
81. SAHOO, Prasanta a Suman Kalyan DAS, 2011. Tribology of electroless nickel coatings – A review. *Materials & Design*. **32**(4), 1760-1775. ISSN 0261-3069.
82. KUSHNER, Arthur, c2019. Electrolytic and Electroless Nickel: What are the main differences between electrolytic nickel and electroless nickel? Can one be substituted for the other in metal finishing?. *PF PRODUCT FINISHING* [online]. Gardner, 6.1.2008 [cit. 2019-01-25]. Dostupné z: <https://www.pfonline.com/articles/electrolytic-and-electroless-nickel>
83. *SurTec® 833: Electroless Nickel with High Content of Phosphorous*, 2009. Dostupné také z: [https://www.surtec.ch/fileadmin/publikationen/PIBs/833\\_Chem.Nickel\\_m.hohem\\_Phosphorgehalt.pdf](https://www.surtec.ch/fileadmin/publikationen/PIBs/833_Chem.Nickel_m.hohem_Phosphorgehalt.pdf)
84. NON-CYANIDE SILVER PLATING: Concurrent Technologies Corporation. Non-Cyanide Silver Plating: Test Report., 1998. *P2 InfoHouse* [online]. Pawtucket (USA) [cit. 2019-01-25]. Dostupné z: <https://p2infohouse.org/ref/38/37018.htm>

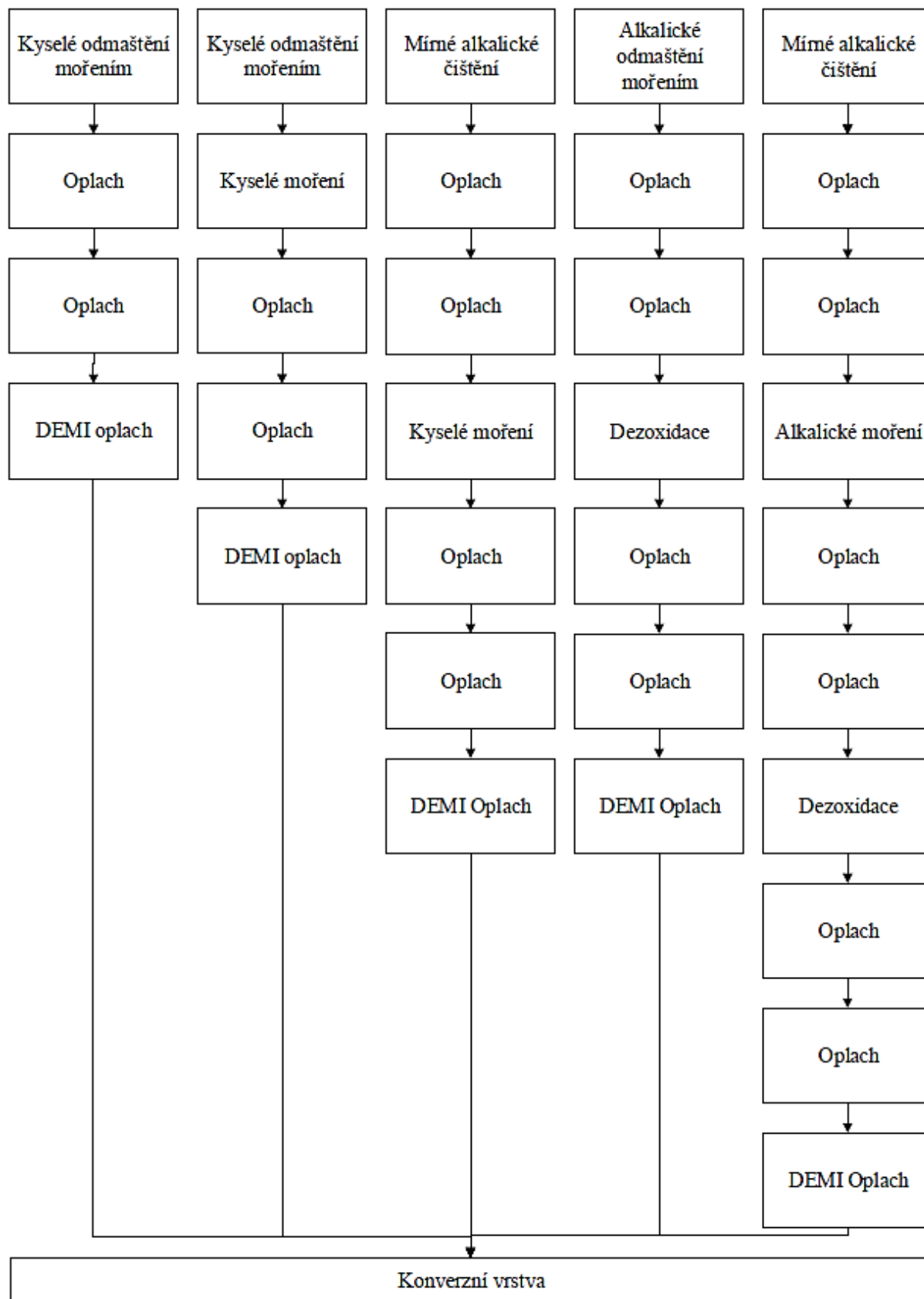
85. KOPELIOVICH, Dimiitri, 2017. Silver plating. *SubsTech: Substances and Technologies*[online]. [cit. 2019-01-25]. Dostupné z: [http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=silver\\_plating#non-cyanide\\_silver\\_plating](http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=silver_plating#non-cyanide_silver_plating)
86. KUCHAR, Jiří a Viktor KREIBLICH, 2017. Renovace technologií tampónování. *Povrcháři* [online]. (1), 6-7 [cit. 2019-01-25]. ISSN 1802-9833. Dostupné z: [http://www.povrchari.cz/kestazeni/201701\\_povrchari.pdf](http://www.povrchari.cz/kestazeni/201701_povrchari.pdf)
87. CERMÁN, Jiří a Petr ŠPATENKA, 2010. Lokální galvanické pokovení – tamponování. *Povrcháři* [online]. (6), 1-4 [cit. 2019-01-25]. ISSN 1802-9833. Dostupné z: [http://www.povrchari.cz/kestazeni/201006\\_povrchari.pdf](http://www.povrchari.cz/kestazeni/201006_povrchari.pdf)
88. Nickel, Ni, c1996-2019. *MatWeb* [online]. MatWeb [cit. 2019-02-26]. Dostupné z: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=e6eb83327e534850a062dbca3bc758dc&ckck=1>
89. Copper, Cu; Annealed, c1996-2019. *MatWeb* [online]. MatWeb [cit. 2019-02-26]. Dostupné z: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=9aebe83845c04c1db5126fada6f76f7e>
90. Electrical Conductivity & Resistivity for Copper & Copper Alloys, c2001-2014. *NDT Resource Center* [online]. Iowa: NDT Education Resource Center [cit. 2019-02-26]. Dostupné z: [https://www.nde-ed.org/GeneralResources/MaterialProperties/ET/ET\\_matlprop\\_Copper.htm](https://www.nde-ed.org/GeneralResources/MaterialProperties/ET/ET_matlprop_Copper.htm)
91. HELMENSTINE, Anne Marie, Table of Electrical Resistivity and Conductivity. *ThoughtCo* [online]. 24. 9. 2018 [cit. 2019-02-26]. Dostupné z: <https://www.thoughtco.com/table-of-electrical-resistivity-conductivity-608499>
92. Electrical Conductivity of Materials, c2006-2019. *Blue Sea Systems* [online]. Blue Sea Systems [cit. 2019-02-26]. Dostupné z: [https://www.blueseasystems.com/resources/108/Electrical\\_Conductivity\\_of\\_Materials](https://www.blueseasystems.com/resources/108/Electrical_Conductivity_of_Materials)
93. Magnetronové naprašování, c2019. *CHEMPOINT* [online]. Brno: Fakulta chemická, Vysoké učení technické v Brně, 15. 02. 2012 [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/magnetronove-naprasovani>
94. LIBRA, Martin, 2003. *Naprašování tenkých vrstev. ELEKTRO* [online]. FCC PUBLIC, 13(7) [cit. 2019-03-25]. ISSN 1210-0889. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/naprasovani-tenkych-vrstev—14441>
95. *Classification of Defects: Klasifikace neshod*, 2017. SURFACE QUALITY INSTITUTE. Dostupné také z: [https://www.katalogvad.cz/wp-content/uploads/2017/10/20170707-Klasifikace\\_neshod.pdf](https://www.katalogvad.cz/wp-content/uploads/2017/10/20170707-Klasifikace_neshod.pdf)
96. ČSN EN 755-2, *Hliník a slitiny hliníku – Lisované tyče, trubky a profily - Část 2: Mechanické vlastnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014. Třídící znak 42 4086.
97. Aluminum 6101B Composition Spec, c1996-2019. *MatWeb* [online]. MatWeb [cit. 2019-03-28]. Dostupné z: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=9f1c2bea184f4739ab6ae4409d202b62&ckck=1>
98. SZELAG, Petr. *Galvanotechnika: Galvanotechnika a možnosti galvanotechniky ABB 2019*. Praha, 2019.
99. SZELAG, Petr. *Galvanické stříbření: Stříbření ABB 2019*. Praha, 2019.

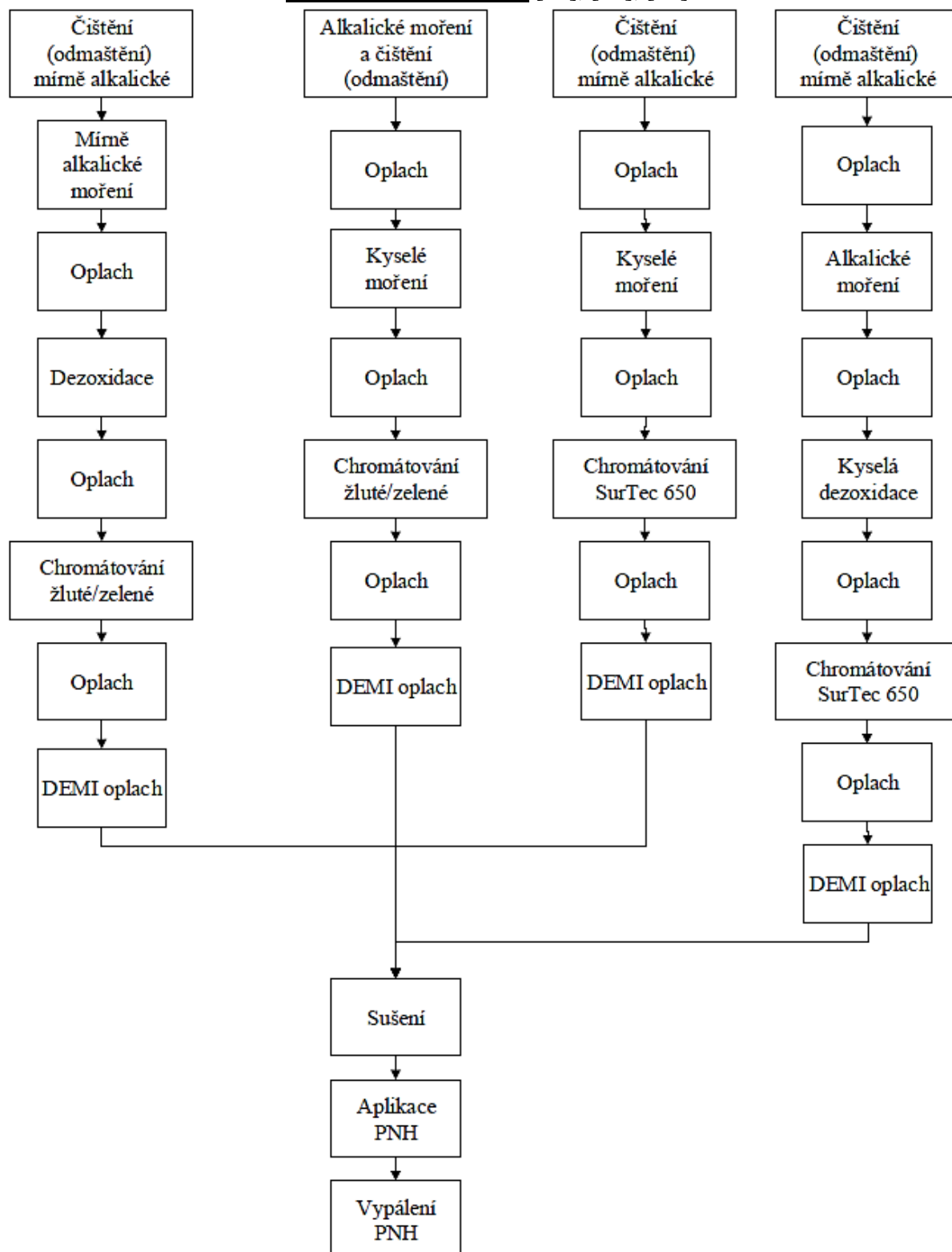
## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

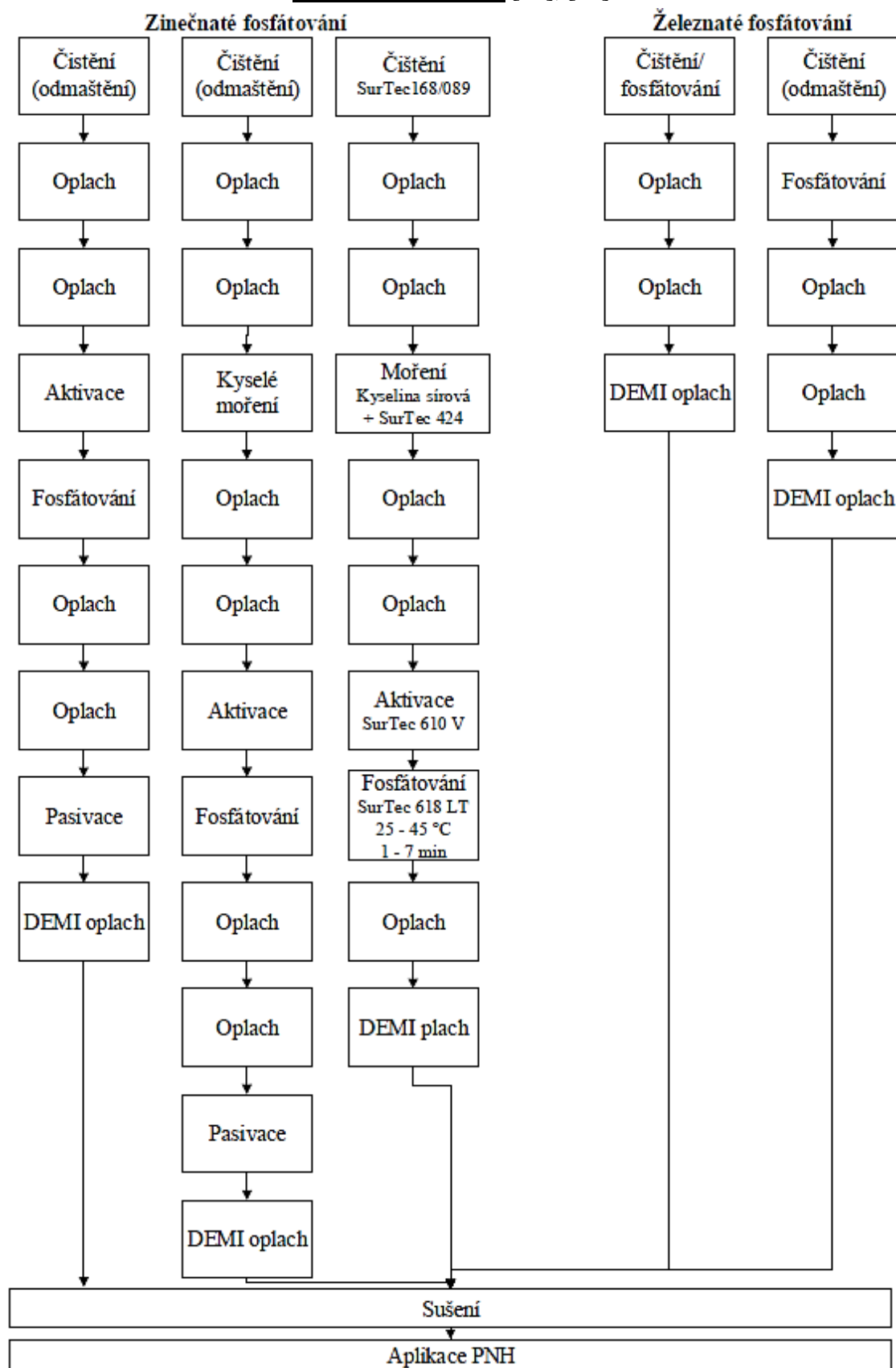
Označení	Legenda
Ag	Stříbro
Ag <sub>2</sub> S	Sulfid stříbrný
Al	Hliník
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Oxid hlinitý
C	Uhlík
CTZ	Cyklické tepelné zatížení
Cu	Měď
EDS	Energeticky disperzní rentgenová spektroskopie
ET	Simulace extrémní teploty při procesu vypalování PNH
Fe	Železo
ChP	Standartní proces chemické předúpravy
ChPTZ	Standartní proces chemické předúpravy a tepelné zatížení
K(Ag(CN) <sub>2</sub> )	Kyanostříbrnan draselný
KCN	Kyanid draselný
LTO	Lehké topné oleje
Mg	Hořčík
Mn	Mangan
Ni	Nikl
Ni-P	Vrstva niklu s určitým obsahem fosforu vyloučená chemicky
NOK	Z angl. Not Okay, v dipl. práci použito jako výraz pro neuspokojivý výsledek zkoušek VK, TP a TT
O	Kyslík
OK	Z angl. slova Okay, v dipl. práci použito jako výraz pro výsledky zkoušek VK, TP a TT v případě splnění jejich podmínek
P	Fosfor
PNH	Prášková nátěrová hmota
SF <sub>6</sub>	Fluorid sírový
Si	Křemík
SiC	Karbid křemíku
TP	Test páskou
TR	Test tepelným rázem
TT	Test třením
VK	Vizuální kontrola
ZM	Základní materiál
Zn	Zinek

## SEZNAM PŘÍLOH

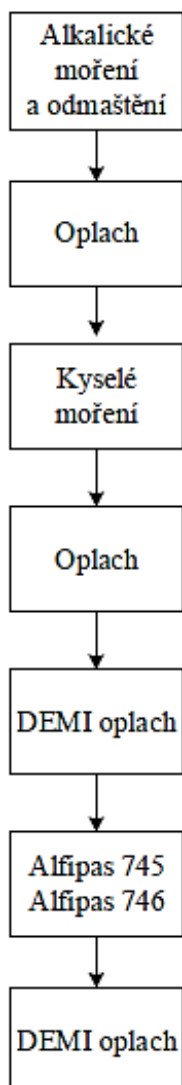
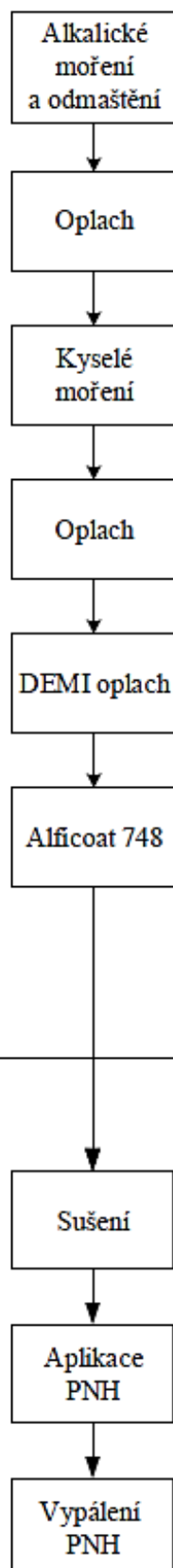
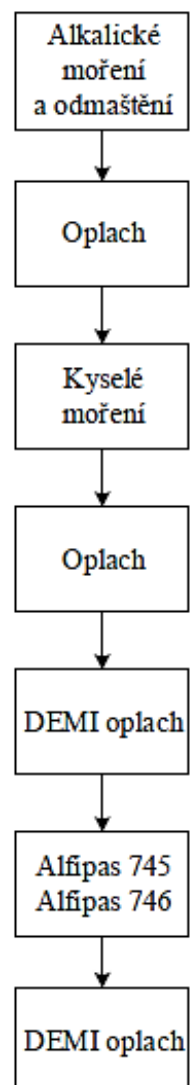
Příloha 1	Metody chemické předúpravy před nanesením konverzní vrstvy [19]
Příloha 2	Metody chromátování [19], [44], [45], [47]
Příloha 3	Metody fosfátování [48], [49]
Příloha 4	Systémy ENVIROX [44]
Příloha 5	Procesní kroky a parametry anodické předúpravy hliníku a jeho slitin za účelem dosažení vyšších korozních vlastností dle GSB International [43], [50]
Příloha 6	Proces anodizace jako předúpravy hliníku před elektrolytickým pokovením [75]
Příloha 7	Porovnání vlastností mědi a niklu
Příloha 8	Testování ve firmě Lars CHEMIE
Příloha 9	Analyzované oblasti

**Metody chemické předúpravy před nanesením konverzní vrstvy [19]**

**Metody chromátování** [19], [44], [47]

**Metody fosfátování** [48], [49]



Systémy ENVIROX [44]**ENVIROX S****ENVIROX NR****ENIROX SG**

**Procesní kroky a parametry anodické předúpravy hliníku a jeho slitin za účelem dosažení vyšších korozních vlastností dle GSB International [43], [50]**

1. Odmaštění
2. Oplach
3. Moření
4. Oplach
5. Vyjasnění
6. Oplach
7. Anodická oxidace

Parametry:

Koncentrace kyseliny sírové:	180 – 220 g/l
Koncentrace hliníku:	< 15 g/l
Teplota:	25 – 30 °C
Proudová hustota:	0,8 – 2,0 A·dm <sup>-2</sup> , stejnosměrný proud
Tloušťka vrstvy:	3 – 8 μm

8. Oplach
9. Oplach demineralizovanou vodou (vodivost vody, která kape po oplachu z materiálu, by neměla přesáhnout 30,0 μS·cm<sup>-1</sup> při 20 °C)
10. Sušení (do teploty 100 °C)

**Proces anodizace jako předúpravy hliníku před elektrolytickým pokovením** [75]

1. Odmaštění organickými rozpouštědly nebo odmaštění pomocí páry
2. Mírné alkalické čištění (např. roztok uhličitanu sodného, fosfátu sodného)
3. Oplach
4. Alkalické moření
5. Oplach
6. Vyjasnění v kyselině dusičné
7. Oplach
8. Anodizace v roztoku kyseliny fosforečné (tab. 40)

Tab. 40 Podmínky pro anodickou oxidaci vybraných slitin hliníku.

Slitina hliníku	Teplota	Napětí	Doba expozice
	[°C]	[V]	[min]
1100	30	22	5
3003	29	22	5
5052	29	22	10
6061	29	22	7

9. Oplach
10. Elektrolytické pokovení

**Porovnání vlastností mědi a niklu**

Tab. 41 Vybrané fyzikální vlastnosti mědi a niklu [88, 89, 90, 91, 92].

Vlastnosti	Jednotka	Měď	Nikl
Hustota	[kg·m <sup>-3</sup> ]	7760	8 880
Teplota tavení	[°C]	1083	1455
Elektrická vodivost	[% IACS*]	100	22
	[S·m <sup>-1</sup> ]	$5,8 \cdot 10^7$	$1,43 \cdot 10^7$
Elektrický odpor (při 20 °C)	[Ω·m]	$1,70 \cdot 10^{-8}$	$6,40 \cdot 10^{-8}$

\* Elektrická vodivost je vztažena k vodivosti mědi ( $5,8001 \cdot 10^7 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ ), kterou organizace IACS (International Annealed Copper Standard) stanovila jako 100 % IACS při 20 °C.

**Testování ve firmě Lars CHEMIE**

Před zavěšením vzorků na dopravní tyč manipulátoru se provedlo ruční mechanické zdrsňení povrchu vzorků pomocí brusného rouna ScotchBrite pro odstranění hrubých nečistot a jemné zdrsňení povrchu. Poté byly vzorky zavěšeny buď pomocí drátů (obr. 53), nebo pomocí tyčí a svorek (obr. 54) na tyč manipulátoru. Hodnota proudové hustoty použitá při pokovování povrchu vzorků se volila s přihlédnutím k doporučené hodnotě uvedené v technickém listu. Pomocí výpočtu proudové hustoty a přihlédnutí k doporučené proudové hustotě dle technického listu lázně se zvolil proud. Příklady vad jsou na obrázku 55 a obrázku 56.



Obr. 53 Zavěšení – drát



Obr. 54 Zavěšení – tyč

Tab. 42 Výsledky testování.

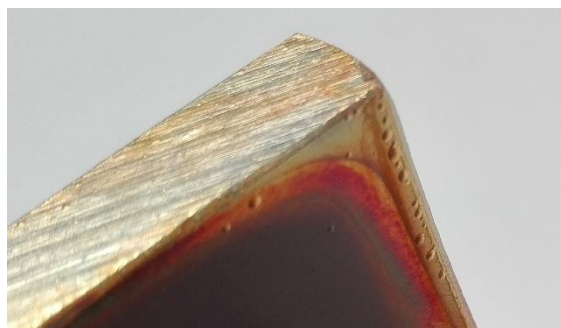
Č.	Zavěšení*	Deponované vrstvy**	Proudová hustota J	Čas	Čas	Čas	VK	TP před TR	TR	TP po TR
				Moření	Zn	Cu				
			[A/dm <sup>2</sup> ]	[s]	[s]	[min]				
19X	d	Zn+M	2,2	240	10	9	OK	OK	NOK	-
18X	d	Zn+M	4	240	10	9	OK	OK	NOK	-
20X	d	Zn+M	1,8	240	10	9	OK	OK	NOK	-
13X	d	Zn+M	0,3	240	10	40	OK	OK	OK	OK
10X	d	Zn+M	0,3	600	10	30	OK	OK	OK	OK
11X	d	Zn+M	0,3	600	10	30	OK	OK	OK	OK
12X	d	Zn+M	0,3	600	10	30	OK	OK	OK	OK
14X	d	Zn+M	0,3	600	10	30	OK	OK	OK	OK
4	d	Zn+M	0,8	600	10	25	OK	OK	OK	OK
5	d	Zn+M	0,8	600	10	25	OK	OK	OK	OK
16X	d	Zn+M	0,8	600	10	15	NOK	-	-	-
15X	d	Zn+M	0,8	600	10	15	NOK	-	-	-
9X	d	Zn+M	0,8	600	10	15	NOK	-	-	-
4X	t	Zn+M	0,8	600	10	15	OK	OK	OK	OK
X	t	Zn+M	0,8	600	10	15	OK	OK	OK	OK
720	t	Zn+M	0,8	600	10	15	OK	OK	OK	OK
15x	d	Zn+M	0,8	600	10	40	OK	OK	NOK	-

Tab. 42 Výsledky testování.

Č.	Zavěšení*	Deponované vrstvy**	Proudo- vá hustota J	Čas	Čas	Čas	VK	TP před TR	TR	TP po TR
				Moření	Zn	Cu				
			[A/dm <sup>2</sup> ]	[s]	[s]	[min]				
9x	d	Zn+M	0,8	600	10	40	NOK	-	-	-
16x	d	Zn+M	0,8	600	10	40	OK	OK	OK	OK
17x	t	Zn+M	0,8	600	10	40	OK	NOK	-	-
x	t	Zn+M	0,8	600	10	40	OK	OK	NOK	-
x	t	Zn+M	0,8	600	10	40	OK	OK	NOK	-
4x	d	Zn+M	0,5	600	10	60	OK	OK	OK	OK
x	d	Zn+M	0,5	600	10	60	OK	OK	OK	OK
x	d	Zn+M	0,5	600	10	60	OK	NOK	-	-
8	t	Zn+M	0,5	600	10	60	NOK	-	-	-
7	t	Zn+M	0,5	600	10	60	NOK	-	-	-
6	t	Zn+M	0,5	600	10	60	NOK	-	-	-
17	t	Zn+M	0,8	600	10	35	OK	OK	NOK	-
14	t	Zn+M	0,8	600	30	35	OK	OK	NOK	-
15	t	Zn+M	0,8	240	10	35	OK	OK	OK	OK
16	t	Zn+M	0,8	240	30	35	OK	OK	OK	OK
18	t	Zn+M	0,8	600	30	35	OK	OK	OK	OK
20	t	Zn+M	0,8	600	10	35	OK	OK	OK	OK
19	t	Zn+M	0,8	240	30	35	OK	OK	NOK	-
21	t	Zn+M	0,8	240	10	35	OK	OK	OK	OK

\* t = tyč, d = drát

\*\* Zn+M = zinkát a měď



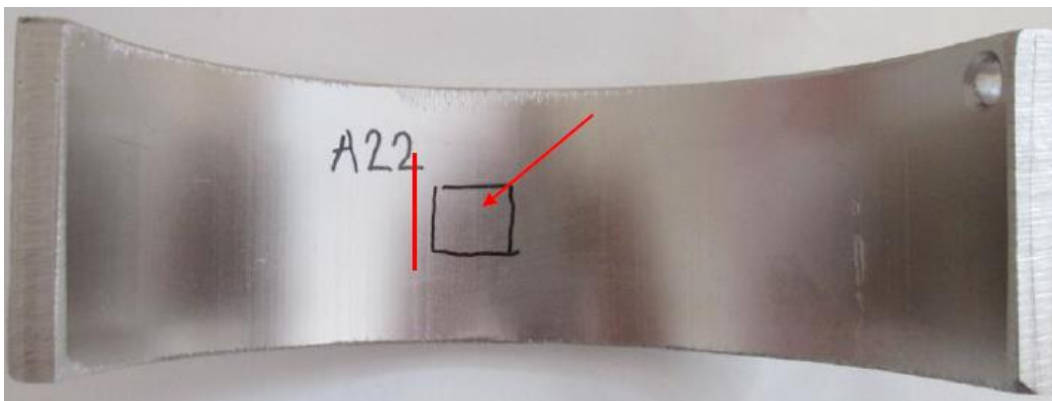
Obr. 55 Vzorek 19X po TR



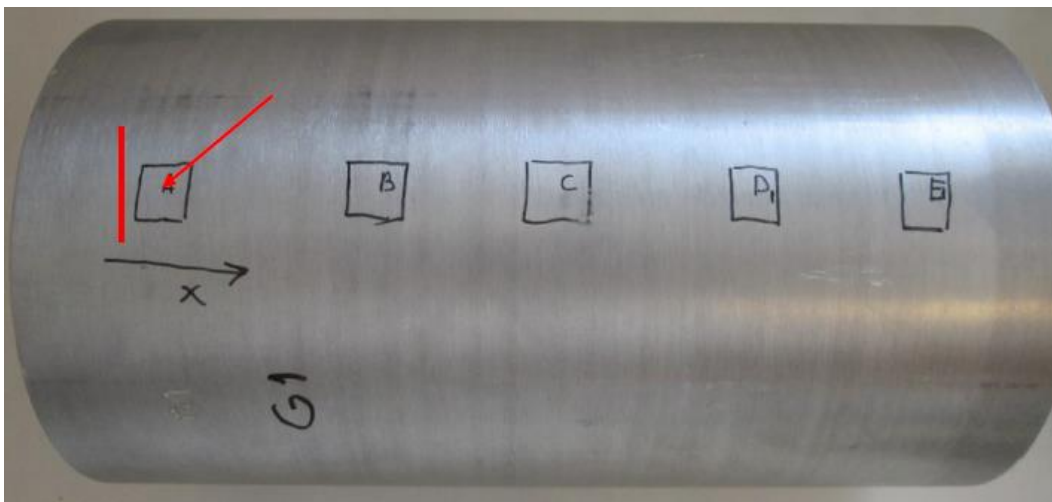
Obr. 56 Vzorek 18X po TR

**Analyzované oblasti**

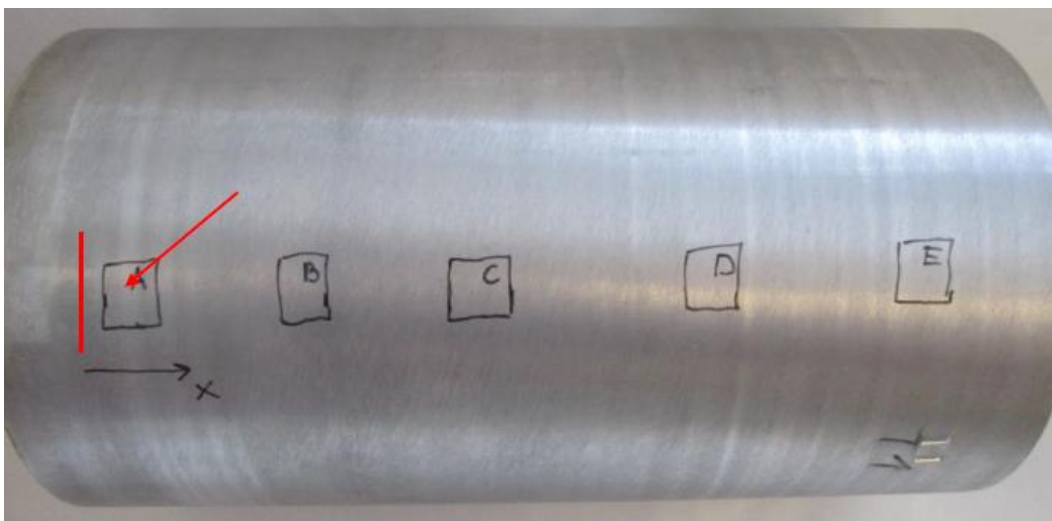
Červená šipka na obrázku 57, obrázku 58 a obrázku 59 označuje analyzované oblasti a červená čára provedené řezy, ze kterých byl proveden metalografický výbrus.



Obr. 57 Vodič A 22



Obr. 58 Vodič B G1



Obr. 59 Vodič B T1